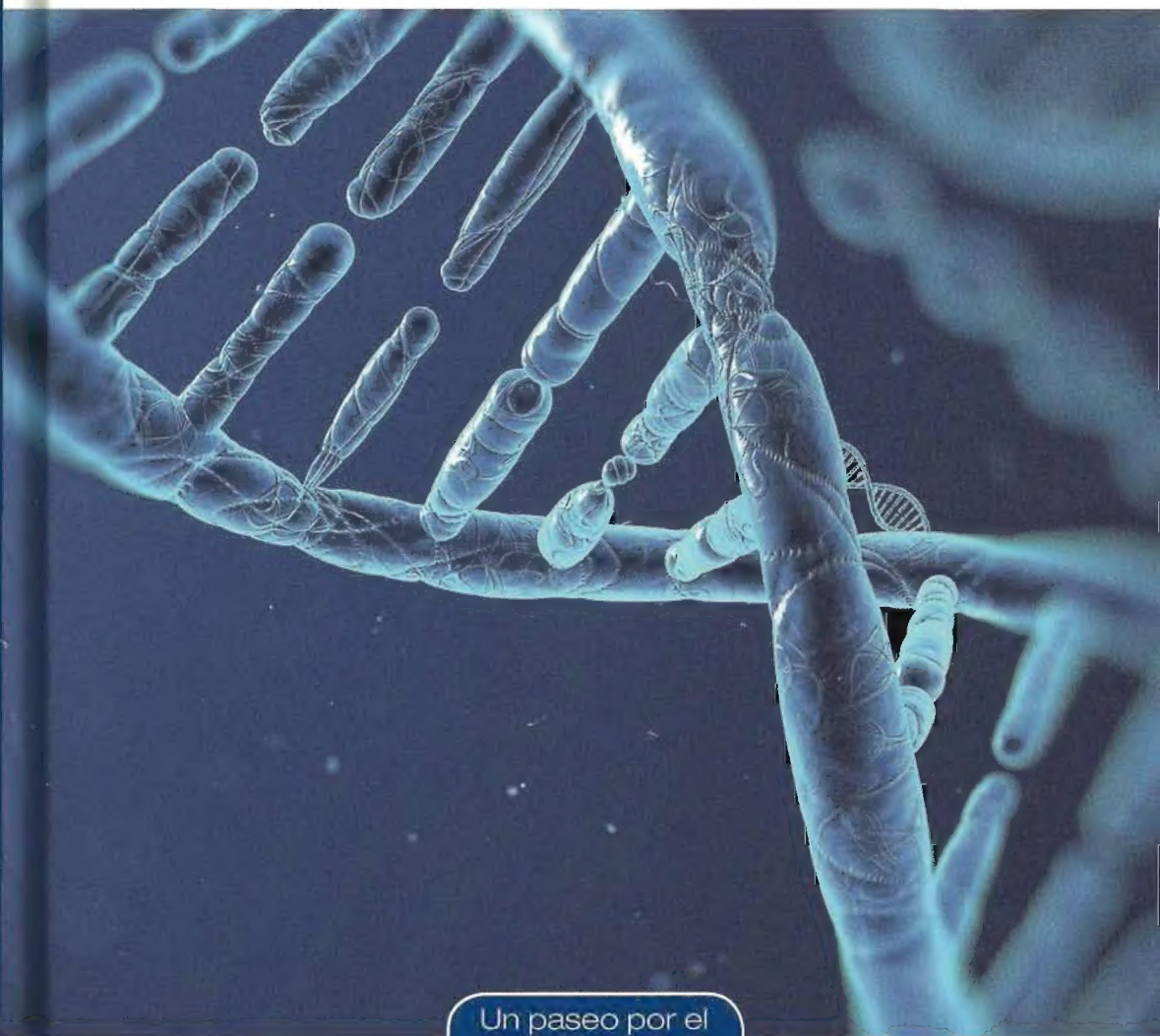


La evolución

El fenómeno más complejo
del universo



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmormoreau.blogspot.com/>

La evolución

El fenómeno más complejo
del universo

RBA

Imagen de cubierta: Representación artística de un fragmento de ADN.
Los errores de copia de esta molécula causan la variabilidad de la herencia genética que da pie a la evolución.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© David Blanco Laserna por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITTEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Armando/Wikimedia Commons: 39c; Arpingstone/Wikimedia Commons: 149b; Des Callaghan/Wikimedia Commons: 39i; Chase Studio/Age Fotostock: 23b; Zina Deretsky/National Science Foundation: 78; Jitinder P. Dubey/Wikimedia Commons: 119; Joshua «Scorpion451» Evans/Wikimedia Commons: 23a; Luis Fernández García/Wikimedia Commons: 85; J.J. Harrison/Wikimedia Commons: 38c; Monika Korzeniec/Wikimedia Commons: 133a; Mabelcalabuig/Wikimedia Commons: 39d; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): 38i; Orchi/Wikimedia Commons: 116; Wojciech J. Fluciennik/Wikimedia Commons: 133b; Science Photo Library/Age Fotostock: 99; Servicio de Información y Noticias Científicas (SINC): 34; Donkey Shot/Wikimedia Commons: 149a; Svsls/IStock: portada; Stefan3345/Wikimedia Commons: 103; Tintinnidguy/Wikimedia Commons: 38d; Wellcome Library, London: 153.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8675-8
Depósito legal: B-24094-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)
Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Magia lenta 13
CAPÍTULO 2	El origen de las especies 45
CAPÍTULO 3	La ilusión de propósito 81
CAPÍTULO 4	Sexo, mentiras y altruismo 109
CAPÍTULO 5	Más allá de la selección natural 137
LECTURAS RECOMENDADAS	155
ÍNDICE	157

Los seres vivos encarnan la evolución. Las bacterias, las algas rojas, los tiranosaurios o los trilobites son la parte más vistosa y deslumbrante del desfile de la vida, pero su atractivo enmascara la verdadera trama. El tema de fondo trasciende las especies. La evolución, en realidad, sigue las peripecias de un protagonista abstracto, elusivo, que carece de patas, membranas o pseudópodos. Tampoco respira, fermenta ni practica la fotosíntesis. Se trata de un diseño molecular, el plan de obra de un complejísimo autómatas químico que ensambló el azar en la Tierra joven de hace unos cuatro mil millones de años. Este asombroso mecanismo, la célula, opera sustrayendo energía del entorno, del que también roba átomos y moléculas, que destina a construir y sostener su organización. Los átomos concretos acaban por recuperar la libertad y ocuparse de otros asuntos, pero el diseño, como una posesión diabólica, se proyecta sobre nuevos enjambres de átomos, que se ven sometidos durante un tiempo a su dictadura organizadora. Vienen y van, pero cada vez más átomos hacen turnos en alguna fábrica celular. La vida, como una epidemia, se propaga y subvierte por doquier la relativa simplicidad de la materia inerte. El carbono, el hidrógeno, el azufre, el nitrógeno

y el oxígeno, que de otro modo se acomodarían en sencillas moléculas de agua, dióxido de carbono y amoníaco, en carbonatos, nitratos y sulfatos, componen estructuras mucho más enrevesadas: genes, proteínas, ribosomas, protozoos, nervios, dientes, conchas, vesículas, corazones y alas de mosca.

Quizá el mejor elogio de la imperfección sea considerarla uno de los principales artífices de esta formidable metamorfosis del mundo inanimado. Si las instrucciones para confeccionar nuevas células se hubieran preservado intactas generación tras generación, con la fidelidad con la que se replican los cristales, pronto se habría malogrado este experimento del azar. La evolución es fruto de una inconmensurable cadena de errores y accidentes, que lo han alterado todo para que lo esencial subsistiera. El diseño del autómatas original se ha desvanecido, pero la fuerza primordial que lo animaba, la autorreplicación con ocasionales errores de copia, ha sabido plegarse a cada percance y circunstancia, haciendo gala de una flexibilidad y una capacidad de supervivencia imbatibles. O, más bien, se ha reencarnado tantísimas veces, ensayando tal cantidad de variantes, que, aunque la mayoría fracasaran, la pura fuerza del número ha sabido encontrar siempre una combinación ganadora. Ha sobrevivido al fuego y al hielo, al ácido y a la cal, a la radiactividad, a la luz abrasadora y a la más absoluta oscuridad. Los autómatas han diseminado sus patrones durante millones de años, hasta imponer a los átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno de nuestra Tierra la forma de las células actuales.

¿Hay que considerar la vida como un fenómeno común o irrepetible dentro de la historia del universo? ¿Las primeras células terrestres forman parte de un panteón más amplio de autorreplicadores ancestrales que colonizaron otros planetas? ¿Presentan todos ellos un aire de familia, que imponen las leyes de la química, o estas consienten una inconcebible diversidad? Descartada la opción de trasladarnos a otros mundos para calibrar la verdadera extensión de la dinámica evolutiva, merece la pena apuntar, al menos, su conexión con el resto del cosmos. El tigre y la ameba, el líquen y la acacia, son herederos de microorganismos antiquísimos, pero también del Big Bang, de las vicisitudes

de estrellas que forjaron en sus hornos nucleares elementos químicos esenciales, de los pulsos gravitatorios que Júpiter, Saturno y el Sol sostuvieron en los albores del sistema solar, o de la brutal colisión que noqueó a la Tierra y desprendió la Luna. Son escenas que no pertenecen a la película evolutiva propiamente dicha, sino a su preproducción. Si cualquiera de ellas no hubiera ocurrido o hubiera conocido un desenlace distinto, seríamos muy diferentes. O, quizá, no seríamos en absoluto.

La evolución explica la forma, distribución y razón de ser de los diez millones de especies que hemos llegado a contabilizar como una suma de testamentos traicionados. El ADN ha sido el testigo que cada generación ha entregado a la siguiente, pero cada tramo de la carrera ha adulterado ese legado a su manera. Así, distintos organismos han asumido la insistencia autorreplicadora que propagaron las primeras células, renovando su programa mediante una profusión de reformas. La mayoría condujo a callejones sin salida de los que el tiempo ha borrado todo vestigio, pero otras proporcionaron recursos para la supervivencia ante un entorno siempre inconstante. Algunos de los recorridos más largos alumbraron una constelación de seres vivos de complejidad creciente. La repercusión del diseño aumentó cuando se fractalizó e incorporó células dentro de células, forjando entidades más potentes y versátiles. Sucedió cuando las arqueas —criaturas de aspecto muy parecido a las bacterias, pero con otros usos y costumbres bioquímicos— integraron en su cuerpo celular bacterias y las explotaron como centrales energéticas. Esta microrrevolución industrial fundó el linaje de las células eucariotas, que inventaron el núcleo, el sexo, el suicidio celular o la fagocitosis. Un segundo episodio de integración, en este caso de bacterias fotosintéticas, inauguró la estirpe de las plantas. Las células eucariotas extendieron los mecanismos que habían desarrollado para comunicarse con el entorno para aprender a dialogar entre sí y sincronizarse en la composición de organismos pluricelulares. El advenimiento de la sofisticación no marginó los modelos sencillos, de arqueas y bacterias, verdaderos corredores de fondo de la evolución. Hoy en día la biodiversidad comprende una polifonía de estilos, células minimalistas, barrocas y

posmodernas. Paramecios y cetáceos. Organismos que resisten la congelación o que precisan de la temperatura de ebullición del agua para reproducirse. Con todo, si se rasca bajo la superficie de tan apabullante multiplicidad, asoman engranajes similares. En ocasiones, las piezas son réplicas exactas.

A escala molecular, los seres vivos se muestran como variaciones de motivos afines y sus divergencias se pueden explicar por medio de una secuencia histórica de transformaciones. No solo compartimos cientos de genes con cualquier organismo, tanto las semejanzas como las diferencias reflejan los grandes acontecimientos de la historia de diversificación múltiple. Todos los seres vivos, desde los mamuts hasta los niscalos, pasando por las ortigas, las bacterias de la peste, las pulgas o los pterosaurios, poseen un antepasado común. La desmesurada extensión de la familia admite parentescos ciertamente remotos, pero una genealogía exhaustiva pondría de manifiesto la relación entre cualquier pareja de organismos. Los autómatas celulares hicieron caer las primeras fichas de dominó en una cascada que se ha ido ramificando en larguísimas secuencias causales, a lo largo de miles de millones de años, hasta desembocar en una secuoya o un tiburón. La mayor incertidumbre se centra en el primer acto del drama, el origen de la vida, pero aun cuando nunca logremos desenterrar por completo las raíces del árbol genealógico, la saga familiar que este trata de representar resulta indiscutible.

La clave para desentrañar el orden del mundo natural fue caer en la cuenta de que la taxonomía (la ciencia de la clasificación) escondía un relato. En realidad, se trataba de la historia más grande jamás contada. Su hilo conductor, un cable de altísima tensión, fue el mecanismo de la selección natural, que descubrieron de modo independiente y casi simultáneo Charles Robert Darwin y Alfred Russel Wallace. Los anales de la ciencia están trufados de coincidencias semejantes. Menos frecuentes son las reacciones generosas por parte de los afectados, una vez se desvanecen la alarma y decepción iniciales. La puesta de largo de la selección natural tuvo lugar en la Sociedad Linneana de Londres, el primer día de julio de 1858, con la lectura de un artículo con-

junto de Darwin y Wallace. También escribieron a cuatro manos una monumental correspondencia, dictada por el afecto y respeto mutuos, y por un entusiasmo inagotable hacia los escarabajos, las orquídeas o las aves del paraíso. Ambos atesoraban un conocimiento enciclopédico del mundo natural y habían paseado por selvas y archipiélagos una mirada tan curiosa como perspicaz. ¿Por qué la posteridad quiso situar a Wallace a la sombra de Darwin? Puede que parte de la oscuridad la proyecten otras materias que absorbieron la atención de Wallace en sus últimos años, como el espiritismo, el mesmerismo o sus campañas contra la vacunación. La imaginación popular pudo vincular a Darwin con un mono, pero jamás con un ectoplasma. Y, desde luego, si hay un planeta capaz de provocar un eclipse ese es *El origen de las especies*.

Se puede discutir si los *Principia* de Newton merecen arrebatarse o no el puesto de mejor libro científico de la historia. Antes hay que leer ambos, propósito que demanda un esfuerzo desigual. Darwin escribió para convencer a cualquier lector que se asomara a sus páginas con la voluntad de atender sus argumentos. Lleno de elocuencia, de vibrantes descripciones, incluso de humor, el libro desprende todavía su fuerza cautivadora. Newton escribía solo para iniciados y hace falta descryptarlo. Los *Principia* se alzan como el *Finnegans Wake* de la ciencia. Fuera de un reducido círculo de especialistas, resulta tan fácil ensalzar sus virtudes como abandonar, por impracticable, su lectura.

Wallace y Darwin nunca cayeron en la competencia feroz que suele asociarse con la selección natural. En mayo de 1864, Wallace escribía a Darwin: «En cuanto a la selección natural, siempre mantendré que en realidad es obra tuya y solo tuya. La has desarrollado en aspectos que yo nunca había considerado, años antes de que yo viera algo de luz en el asunto, y mi artículo nunca hubiera convencido a nadie o no hubiera recibido más consideración que la de una especulación ingeniosa, mientras que tu libro ha revolucionado el estudio de la historia natural y ha logrado la adhesión entusiasta de los mejores hombres de nuestro tiempo». Que Darwin brillara más no deslució el caudal de aportaciones originales de Wallace a la teoría de la evolución,

entre las que destaca su estudio de la distribución temporal y geográfica de las especies.

Por su parte, Darwin sigue asomando en la bibliografía de numerosos artículos de investigación, donde se citan párrafos enteros de sus libros. Su campo de observación fue dilatadísimo y atisbó muchos filones que hoy en día se siguen explotando, en el campo de la coevolución o de la selección sexual, por ejemplo. Incluso al considerar corrientes de biología evolutiva de rabiosa actualidad, como la teoría de construcción de nichos, resulta que Darwin ya había reparado antes en el asunto, en un libro de 1881 consagrado a las lombrices de tierra. Tampoco era omnisciente. Darwin desconocía alguno de los mimbres básicos que conforman la moderna teoría de la evolución, que nos han brindado la genética o la biología molecular; en particular, cómo opera el mecanismo de la herencia. Ignoraba también fenómenos como el desplazamiento de los continentes o la deriva génica, por no hablar de los cientos de miles de fósiles que se han desenterrado desde su muerte. Esos huesos, plumas y gotas de ámbar alumbran metamorfosis evolutivas que, por comparación, hacen que las que relataba Ovidio, de una ninfa en un árbol o de un joven en una flor, parezcan un truco de barraca de feria.

El genetista de origen ruso Theodosius Dobzhansky tituló uno de sus ensayos con una declaración de principios que abrazaron después muchos investigadores: «Nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución». La comprensión de la naturaleza de esa luz no ha dejado de crecer en los últimos ciento cincuenta años, al mismo tenor que la cantidad de objetos que debe alumbrar.

Magia lenta

Por llamativas que resulten las diferencias entre una bacteria y un delfín, no dejan de ser parientes. Eso sí, tan lejanos como lo ha permitido la deriva del tiempo a lo largo de miles de millones de años. A nuestros ojos, la evolución pasa inadvertida por su extrema lentitud.

Si algo caracteriza a la vida es su diversidad. Las últimas estimaciones, siempre en alza, rayan en los diez millones de especies vivas, una cantidad que desborda las pretensiones del coleccionista más ambicioso. Desde un presupuesto fijista, predominante en el momento en el que la selección natural hizo su entrada en escena, todas las especies serían viejas conocidas, veteranas que contemplaron al mismo tiempo la primera luz de la Tierra. Los fantásticos animales y plantas cuya fisonomía dejaban entrever los fósiles debían de habitar las regiones del planeta que hasta entonces habían esquivado la mirada inquisitiva de los exploradores. Los fijistas toleraban, bien es verdad, una cierta plasticidad, pero siempre dentro de un orden. Concedían al ambiente local un margen para que realizara ajustes finos en los remates de cada especie, aspectos accesorios que no las definían, como la pigmentación, el tamaño del cuerpo o el periodo de floración. Esta elasticidad se ejercía a modo de muelle: nunca podía transgredir los límites de cada una de las categorías y, una vez desaparecida la tensión, la especie regresaba a su estado original. Incluso las especies híbridas que pergeñaban botánicos y horticultores, cruzando primulas con primaveras, o tulipanes, no

hacían sino explotar algunas potencialidades que la naturaleza les brindaba. En ningún caso el resultado de sus manejos consolidaba una categoría nueva, equiparable a las primigenias, ya que a su juicio, sin injerencia humana, los híbridos se echaban a perder.

La premisa darwinista adopta un enfoque opuesto al del fijismo. No solo rompe los cercos que separan las especies, sino que las considera meras estaciones de paso. En cada una late la imposibilidad de grabar en piedra sus singularidades y forjar con ellas una categoría invulnerable al curso del tiempo. Cada bacteria, tejón o coral guarda en sus genes el mandato de lo efímero. Todos están condenados a traicionar su esencia y desvanecerse. De hecho, las categorías son fruto de una ilusión que presenta una imagen estática donde solo hay movimiento. Siglos de escrutinio del mundo natural nos han proporcionado un solo fotograma de una película que progresa al más extremo ralenti. Resulta muy difícil apreciar la naturaleza dinámica de un proceso que, desde nuestra limitada percepción del tiempo, parece detenido. La proyección de la película acelerada, a una velocidad que multiplicase por un millón el paso ordinario de las imágenes, mostraría la maleabilidad de las categorías. Una especie no es más que una configuración circunstancial de los organismos, de la que la deriva evolutiva los aleja irremisiblemente para hacerlos arribar a otra distinta, en la que tampoco podrán recalar demasiado tiempo.

No todas las especies se transforman al mismo ritmo y en el mismo grado, pero todas incuban una inexorable metamorfosis. Hay que buscar el motivo en la naturaleza voluble de la información genética, donde se cifra su identidad, que cada generación lega a la siguiente. Esta identidad no descansa en alguna noción abstracta concebida por un naturalista decimonónico o por un filósofo griego, sino en un efímero receptáculo material, una larga cadena de ADN, que se copia una y otra vez, expuesta a complejos avatares físicos y químicos de los que resulta imposible salir siempre indemne. Tarde o temprano se produce un error de copia, un virus empalma en la cadena un nuevo fragmento de ADN o un fotón muy energético atraviesa la célula y desvirtúa el

proceso. Gran parte de las variantes se muestran inocuas, otras son letales y dentro de una tercera categoría entran aquellas que, finalmente, abren la puerta a las mejoras adaptativas. Donde hay que manejar el término «mejora» con precaución, ya que no podría depender más del contexto.

La identidad que heredan los organismos sufre modificaciones aleatorias, pero que estas prosperen o no se decide ante un tribunal en absoluto arbitrario. La selección natural actúa como un juez de muchos rostros, que siempre falla en el mismo sentido. A veces lo convoca un predador; otras, su ausencia; en ocasiones lo hace un competidor de la misma especie, o de otra, o un parásito, o una plaga que agota la principal fuente de alimento. Puede comparecer a causa de una sequía prolongada, del aumento de la temperatura del agua, del descenso en los niveles de oxígeno o de la brecha reciente entre dos continentes que se vuelve insalvable. Cada contexto dicta sentencia a favor o en contra de la novedad. Un veredicto adverso condena a los individuos que la adoptaron. Si es favorable, una mejora adaptativa se integra en la herencia. La suma de sentencias favorables va configurando un plan de reforma por entregas que, con el curso de miles o millones de años, convierte al antepasado de una anémona en un tiburón o una salamandra. El plan adolece de una miopía severa y solo entiende las mejoras en el corto plazo. Sin embargo, una larguísima cadena de retoques circunstanciales conecta paso a paso la lámina microscópica de células fotosensibles de un gusano ancestral con el ojo de un calamar o de un halcón.

Por tanto, la evolución va mucho más allá de una actitud iconoclasta que irrumpe en el panteón de las especies para abolir sus patrones inmutables. Explica la multiplicidad a partir de los vaivenes de la herencia y de las vicisitudes que sufren las poblaciones y revela una historia donde la sorpresa no se produce en el desenlace, que ya conocemos, sino en su principio. La arquea, el coral negro o la tarántula cuentan lo que le ocurrió a la herencia vulnerable de las células primigenias, que no supieron conservar su integridad generación tras generación. Su incapacidad para permanecer fieles a sí mismas bastó para que la pluralidad de contextos en los que hubieron de desenvolverse

y la criba impuesta por la selección natural pusieran en marcha un proceso de diversificación tan parsimonioso como inevitable.

Al advertir en la complejidad de los seres vivos las cicatrices del tiempo, la evolución trata de reconstruir el pasado que las causó.

En otra Tierra, la misma célula primordial no habría dado lugar

a una orquídea o un amonites. En ese

sentido, los organismos ofrecen un registro palpitante de accidentes singulares, acontecimientos geológicos

y astronómicos. Todo se halla relacionado: el incendio que acaba con los

individuos de una población, el error de copia que se introduce en el geno-

ma de un pez pulmonado, la colisión de un cometa, el grado de inclinación

del eje terrestre o la deriva de los continentes. Factores incalculables inciden en la rectificación de la herencia y la impulsan en una u otra dirección, como un viento que a veces sopla más o

menos fuerte, de levante o de poniente. La propia vida participa como uno de los agentes de cambio más poderosos. Induce alteraciones químicas o geológicas a gran escala, levanta acantilados de caliza o modifica la composición de la atmósfera, promoviendo el desarrollo de nuevas rutas bioquímicas, sirve de alimento o da caza, compite por los mismos recursos o coopera. En gran medida, la presión que soportan los organismos la ejercen otros, con frecuencia de la misma especie.

El interior de cada órgano, cada célula y cada fragmento de ADN de nuestros cuerpos alberga más de tres mil quinientos millones de años de historia de la vida.

NEIL SHUBIN, *THE UNIVERSE WITHIN*

EL ARTIFICIO DE LA LENTITUD

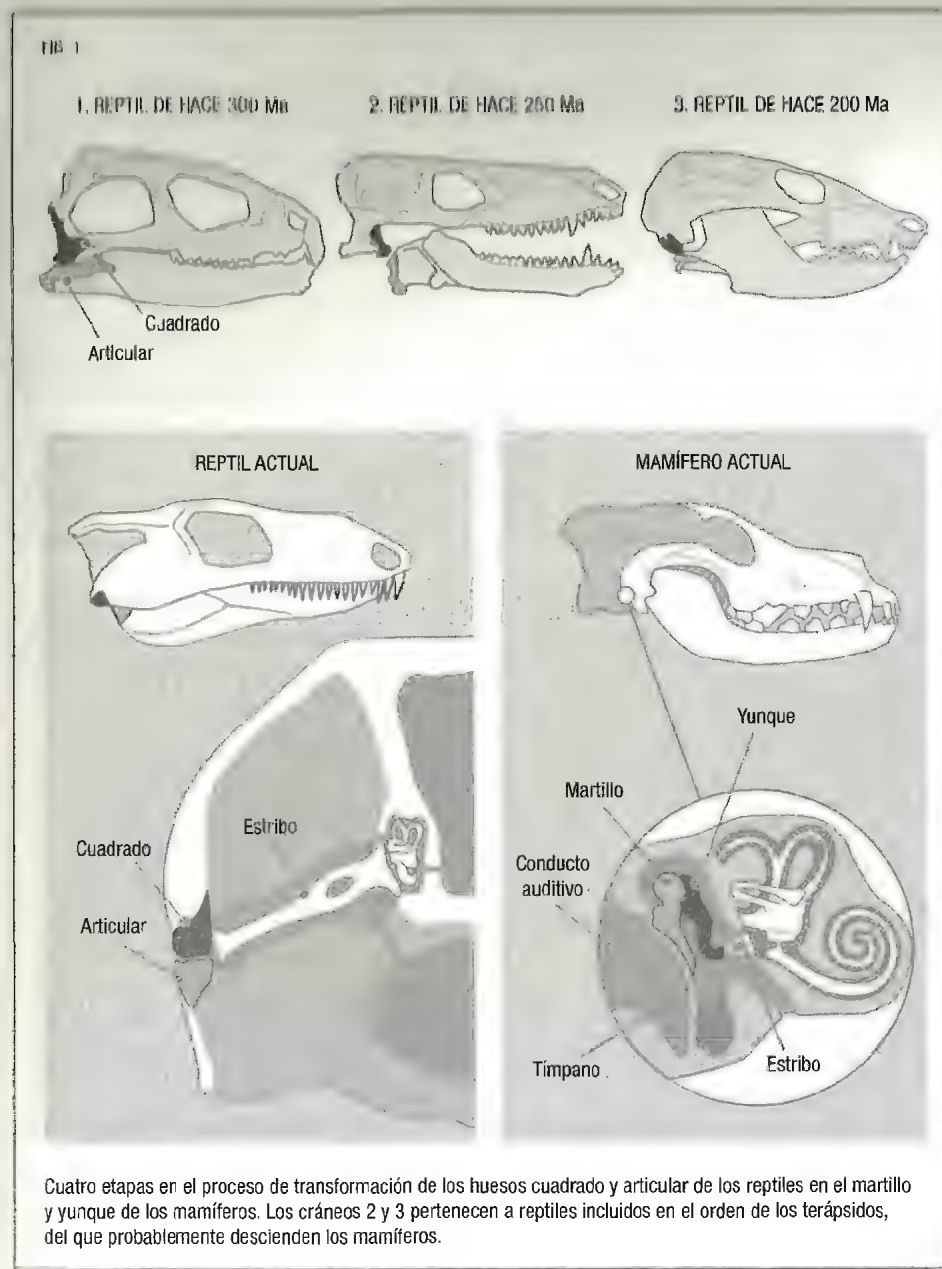
Nuestro conocimiento de la narración evolutiva resulta fragmentario. Hemos llegado tarde a la sesión y entramos en la sala justo cuando se estaban encendiendo las luces. Después de tres mil quinientos millones de años, se estima que un billón de especies han acompañado a la Tierra en su largo peregrinar alrededor del Sol. Más del 99% se han extinguido. Entre ellas, la fracción que ha dejado un registro fósil es mínima. Además, los fósiles apor-

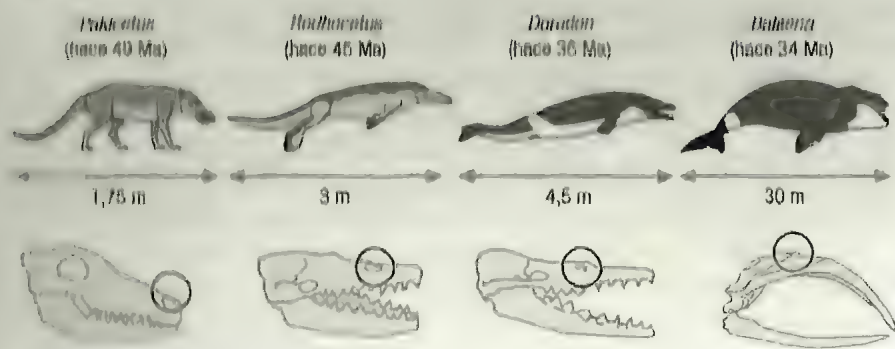
tan una visión distorsionada de la vida desaparecida, puesto que tampoco ofrecen una selección representativa de ejemplares. La naturaleza carece de embalsamadores y abunda en carroñeros y recicladores, que consideran exquisito cualquier cadáver. Los microorganismos son responsables de la máxima bíblica de que todo decae, ayudados por una legión de invertebrados y necrófagos de mayor envergadura. Para esquivar su presencia casi ubicua, tienen que concurrir circunstancias excepcionales, que preservan en su mayoría los restos de organismos con partes duras y mineralizables. Los fósiles proyectan luz en esquinas concretas de la escena evolutiva, como el pasado de los moluscos, los vertebrados y los equinodermos, seres que incorporaron carbonato o fosfato de calcio a sus huesos, sus conchas o sus dientes. Aquellos de cuerpo blando, o con soportes más endebles, como la quitina, permanecen en la penumbra. Se trata de una vastísima región oscura, si tenemos en cuenta que las especies de cuerpo blando fueron la norma durante ocho décimas partes de la historia de la vida.

El lugar de la muerte también resulta determinante. Los aspirantes a fósil deben morir, como los piratas, en el mar, o cerca de un lago o un río, donde una mortaja de lodo cubra su cuerpo. Hábitats henchidos de vida, como las selvas y los bosques, quedan prácticamente excluidos, ya que allí una plétora de seres vivos desguaza los cadáveres pieza a pieza, cada uno con arreglo a su escala y sus necesidades, desde el vertebrado hasta la bacteria, pasando por los insectos, las arañas, los paramecios, cada uno en pos de su trozo de carne, su tejido, su molécula. Incurriendo en una obviedad no siempre evidente, merece la pena señalar que los fósiles solo representan a aquellos organismos que fosilizan bien y que vivieron en entornos que favorecerían su formación. Cuando escasean en un cierto periodo, ¿se debe a que, en efecto, había entonces menos animales o a factores que inhibieron la fosilización, como un descenso en la concentración de oxígeno? Quien pretenda desentrañar la historia completa de los gusanos, los artrópodos sin refuerzos de calcita en el exoesqueleto o los seres unicelulares —vale decir, la historia de los principales pobladores de la Tierra— persigue una causa perdida.

Estas lagunas no impiden que los fósiles muestren historias evolutivas muy elocuentes. Los esqueletos atestiguan la asombrosa metamorfosis de un ancestro de los reptiles en uno de los primeros mamíferos. Los paleontólogos han seguido la pista, desde el Carbonífero hasta el Jurásico, a dos huesos característicos de la mandíbula reptiliana, el cuadrado y el articular, contemplando su transformación gradual en los diminutos yunque y martillo del oído medio mamífero (figura 1). Otra serie de litografías fósiles documenta el retorno de un grupo de mamíferos terrestres al mar. Desde un antepasado de *Pakicetus* —un cetáceo primitivo— hasta las ballenas actuales, los esqueletos fósiles encajan en una secuencia cronológica irreprochable, exponiendo la atrofia progresiva de las patas, el alargamiento de la cola y la migración del orificio nasal, que parte del morro y acaba encima de los ojos (figura 2). Los fósiles demuestran cómo operan las transiciones, pero no nos deparan la galería imposible y espectral de todos los habitantes pasados de la Tierra. Sin duda, imparten una lección de humildad. Si no fuera por los huesos y las conchas que desenterramos, ¿qué poeta o pintor osaría imaginar las trazas de *Hallucigenia*, *Tullimonstrum gregarium* o *Helicoprion bessonovi*? ¿Qué otras fantásticas criaturas residieron en la Tierra cuyo aspecto nunca sabremos siquiera barruntar? Hay que asumir que las reconstrucciones del pasado siempre cometerán el pecado de omitir ejemplares formidables.

Con todo, quizá el mayor salto que la teoría evolutiva exige a nuestra imaginación consista en aceptar que toda la diversidad de la vida surgió a partir de un solo motivo celular, que el elefante y la bacteria pueden colgar en su sala de estar la foto de un antepasado común. La mutación de las especies constituye un arte imperceptible por su misma lentitud, un truco maestro de lentidigitación. La evolución plantea un desafío a la intuición porque, como fenómeno, escapa casi por completo a la experiencia directa de nuestros sentidos y a la sensibilidad de cualquier aparato que podamos concebir. Por supuesto, se han constatado y provocado reformas en caracteres secundarios de las especies, que llevan la firma de la selección natural. El ejemplo canónico lo ofrece la mariposa de los abedules. La especie





Transición de un linaje de mamíferos terrestres que regresó al mar. Se da una fecha aproximada para ubicarlos temporalmente, en millones de años (Ma). Los círculos destacan la posición en el cráneo del orificio nasal.

comprende dos variantes que difieren en un solo gen: una blanca salpicada de motas oscuras (típica) y otra negra (carbonaria). A lo largo del siglo XIX, la contaminación industrial cubrió la pálida corteza de los abedules ingleses con un manto de hollín, sobre el que la versión negra llamaba menos la atención de los pájaros que se alimentan de las mariposas. La presión evolutiva hizo que la carbonaria prosperase en detrimento de la más expuesta típica, que había predominado hasta entonces. Las tornas se volvieron mediado el siglo siguiente, de resultas de las leyes dictadas para reducir la contaminación. Contra un telón de fondo menos oscuro, la carbonaria se convirtió en un blanco fácil para los pájaros y la típica reconquistó el trono perdido.

Se conocen infinidad de ejemplos análogos en los que, a partir de un cambio en las condiciones ambientales, la selección natural favorece ciertos atributos dentro del repertorio de tipos que brinda una misma especie. Unos los ha provocado el azar de la naturaleza y otros, el ingenio de los experimentadores. Así, el etólogo canadiense John Endler observó el pulso que se establecía en los peces lebistes entre la tendencia a dotar a sus escamas de colores vistosos para atraer a las hembras, muy sensibles a



Dos enigmáticos habitantes de la Tierra primitiva, hoy desaparecidos, que desafían la imaginación. Arriba, una recreación del artista Joshua Evans de *Hallucigenia sparsa*. Abajo, reconstrucción de *Canadia spinosa*, realizada por Chase Stuccio. Ambos organismos vivieron hace quinientos millones de años, en los mares del Cámbrico, periodo en el que surgió una extraordinaria variedad de animales.

semejantes despliegues, y la de asumir un aspecto discreto, que no llamase tanto la atención de otros peces que los han incluido en su dieta. Ante una baja presión predatoria, comprobó cómo la selección natural promocionaba la exuberancia colorista, que se atemperaba rápidamente ante la presencia de predadores más eficaces o numerosos.

Las piñas de *Pinus contorta* desarrollan distintas estrategias para defenderse del saqueo, en función de quién las asalte. Allí donde abundan las ardillas rojas, ganan peso y albergan pocas semillas, desanimando el esfuerzo de los pequeños roedores, que arrancan las piñas enteras y cargan con ellas hasta un escondite. En las regiones libres de ardillas, el principal ladrón del pino es el piquituerto. Este pájaro despoja las piñas *in situ*, hurgando entre sus resquicios o abriéndose camino a picotazos. Frente a él, el pino fomenta la producción de frutos más ligeros, blindando su interior mediante brácteas (escamas protectoras) más largas y gruesas. En respuesta, el piquituerto ha alargado y curvado su pico, con el fin de alcanzar las semillas. Como veremos, en estos casos la selección natural promueve, dentro del catálogo génico de cada especie, los genes responsables de los rasgos que mejor se ajustan a las circunstancias locales. De esta suerte, los individuos se aclimatan, pero sin llegar a salirse de su categoría de especie. Estas maniobras adaptativas menores proporcionan ejemplos de microevolución, género al que también pertenecen las bacterias que se vuelven resistentes a los antibióticos o los insectos inmunes a los pesticidas. Un fijista tal vez las entendería como manifestaciones de la elasticidad que concedía a las especies. Sin embargo, cuando se analiza lo que ocurre a escala molecular, no se advierte ningún muelle que asegure la reversión del proceso antes de que se lleve demasiado lejos. No existe ningún freno a la acción de la selección natural, como demuestran las secuencias fósiles, que ilustran hasta dónde puede llegar cuando se le concede tiempo suficiente para acumular modificaciones. Por desgracia, esos plazos no corresponden a los de una generación humana.

¿O sí? Curiosamente, uno de los procedimientos que genera especies nuevas en el breve plazo de una vida humana puede pasar desapercibido a nuestra escala, pero en este caso no temporal,

sino espacial. Hace falta un estudio de los cromosomas para detectar muchas muestras de poliploidía, una forma de especiación frecuente en las plantas con flores que se consuma en el plazo de tres generaciones. Se basa en errores sucesivos que alteran la producción de gametos (las células sexuales femeninas y masculinas). Cuando se duplican por accidente los cromosomas o se omite su división —con el concurso, a veces, de una oportuna hibridación—, se originan repertorios génicos incompatibles con los de los progenitores, pero capaces de perpetuar linajes propios. El fenómeno se ha documentado, por ejemplo, en helechos o en el arbusto de la onagra.

El potencial transformador de la inestabilidad genética, unido a la herencia y a la selección natural, simplemente se materializa, pero nuestros ojos jamás serán testigos de sus operaciones de mayor calado. El núcleo duro de la evolución, la noción de que cualquier pareja de especies actuales que se escojan al azar, como una medusa y una bacteria de nuestro intestino, se hallan relacionadas por medio de un ancestro común, o de que una larguísima cadena de generaciones nos convierte en descendientes de una esponja de mar anclada en las arenas del Proterozoico, esto es, el despliegue paulatino, por espacio de miles de millones de años, de todos los organismos vivos, resulta inobservable. Nunca asistiremos a la diferenciación y desarrollo de especie tras especie, ni recorreremos el jardín de senderos que se bifurcan al paso geológico de los eones.

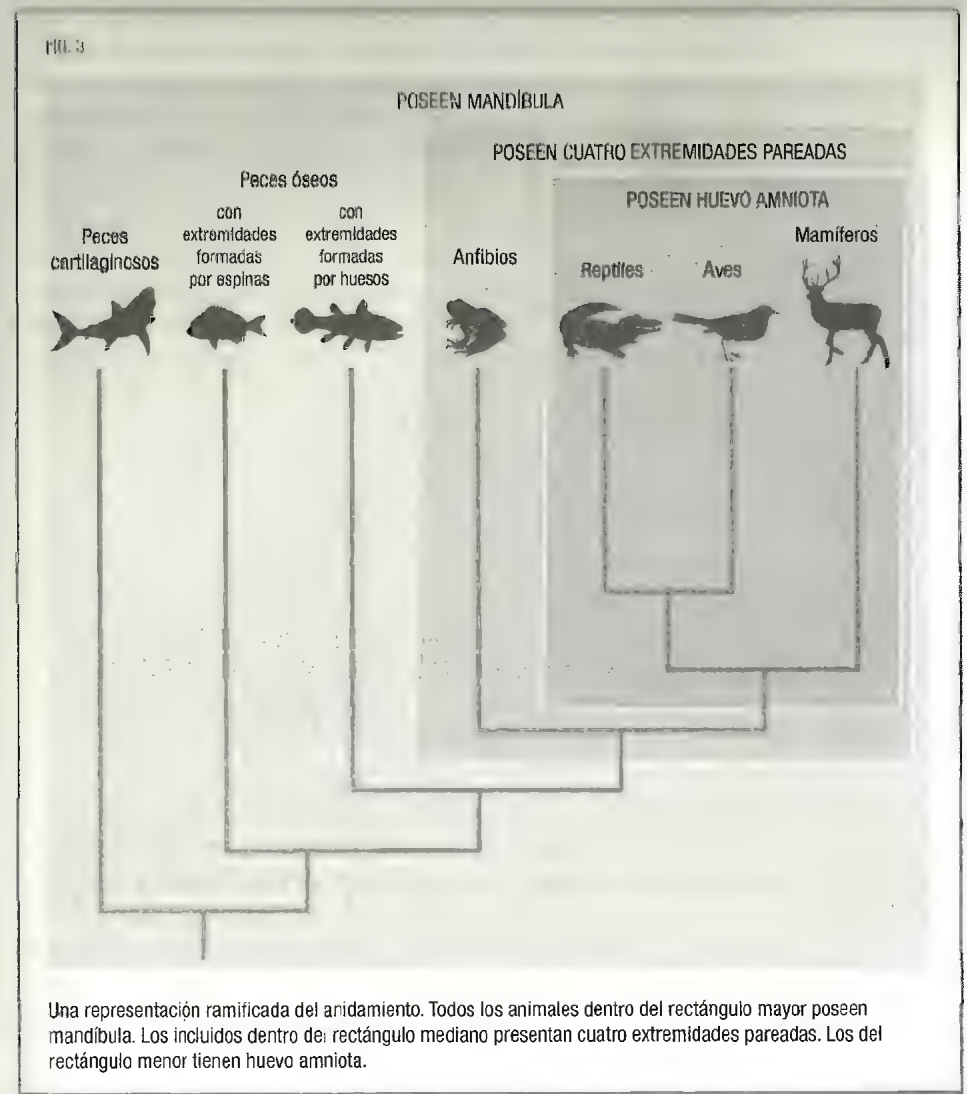
La evolución a gran escala, la macroevolución, nos revela que los espectros que se atisban en los fósiles o en el palimpsesto del ADN merecen un espacio en el panteón familiar. El abanico completo de la vida presente, pasada y futura está emparentado. ¿Cómo lo sabemos?

UN ÁRBOL DE INFINITAS RAMAS

El mundo natural muestra una diversidad apabullante, pero susceptible de clasificación. Los seres vivos no colonizan los océanos, desiertos y tundras con una multiplicidad caótica. Precia-

mon la similitud entre las cucarachas y las termitas, las medusas y los pólipos, la planta del té y la mostaza, la euglena y el tripanosoma. Advertimos en ellos rasgos de familia, diseños corporales afines, esquemas reproductivos o trucos metabólicos compartidos. En suma, el ojo entrenado reconoce principios organizativos que permiten ordenar la desbordante exhibición de disparidad, introducir en su cajón a la rosa y al ornitorrinco, pegar la etiqueta correspondiente en la flor del nenúfar o en el dorso del ciempiés. Del examen atento de una lamprea, un tiranosaurio y una musaraña se desprende un patrón anatómico, la columna vertebral, que brilla por su ausencia en otros grandes grupos, como los artrópodos o las plantas espermatofitas, que ostentan distintivos propios. Los rasgos más extendidos caracterizan las categorías principales, que admiten matices diferenciadores de menor intensidad, que abren líneas secundarias, sujetas, a su vez, a variantes particulares. En los vertebrados se aprecian atributos que definen subconjuntos, dentro de los cuales el afán clasificador encuentra aún peculiaridades identitarias. Existen esqueletos con mandíbulas y sin ellas. En el primer grupo, podemos escoger entre los que se componen de cartílago y los de hueso. Dentro de estos últimos distinguimos con claridad dos tipos: con extremidades óseas o con extremidades formadas por espinas. En el primero destacan los que despliegan cuatro extremidades pareadas. En ellos se aprecian distintos grados de adaptación al medio terrestre, que introducen discrepancias significativas en la reproducción. Hay animales que siguen ligados al agua durante las primeras etapas de su vida y que dependen de ella para la puesta de huevos gelatinosos. Otros se han independizado del medio acuático gracias al huevo amniota, que evita la desecación valiéndose de una cáscara y envolturas membranosas adicionales, que permiten la puesta en tierra. Los hay, en fin, que prescinden de la cáscara. Desarrollan una placenta a partir de una de las membranas del huevo y albergan al embrión dentro del cuerpo. El esquema admite una representación ramificada (figura 3).

Las similitudes se distribuyen, por tanto, en grados diversos, formalizando categorías bien definidas, que encierran otras en



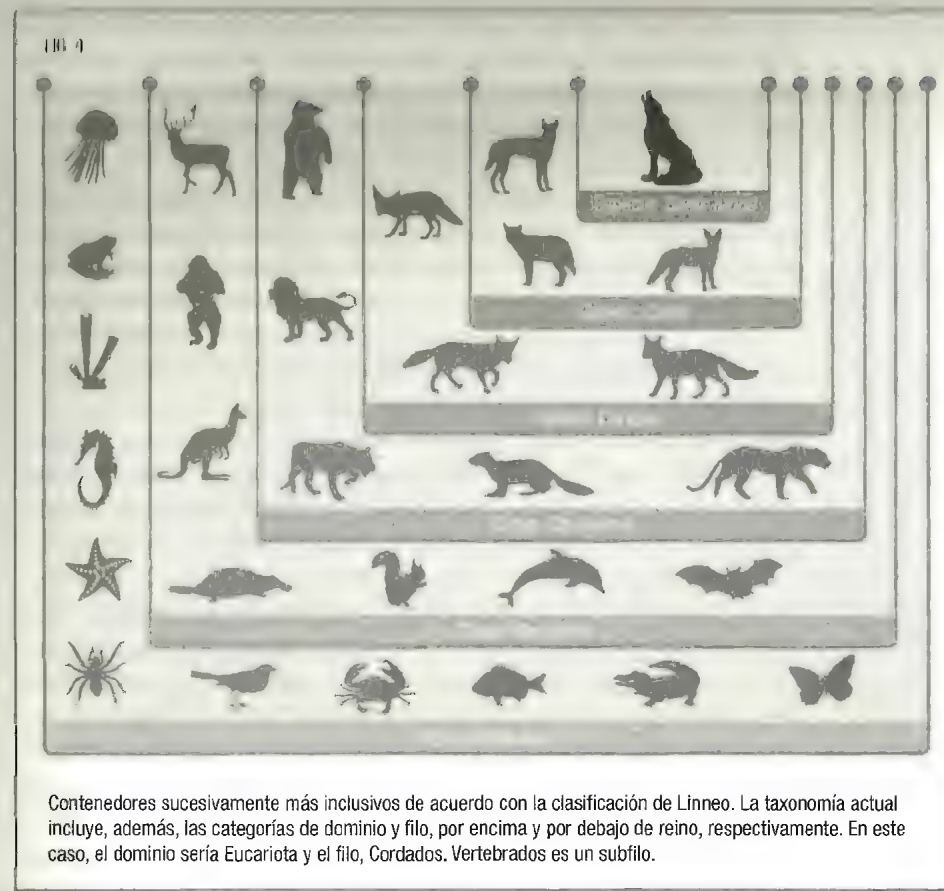
una estructura anidada. En el núcleo de cada muñeca rusa localizamos siempre organismos muy similares y, a medida que consideramos contenedores mayores, aumenta la diversidad, agrupada en torno a una clave común cada vez más genérica. Aun

no llegar a percibir que bajo estas divisiones subyace una razón histórica, la jerarquía se hace evidente. Cien años antes de que la idea de la selección natural germinala, Carlos Linneo emprendió uno de los esfuerzos taxonómicos más ambiciosos. Su notación

binaria latina, de género y especie, todavía le sobrevive. Linneo distribuyó toda la escala de afinidades en categorías progresivamente más inclusivas: especie, género, familia, orden, clase y reino (figura 4). Taxonomistas posteriores intercalaron nuevos niveles en el sistema, al que incorporaron además numerosas especies que Linneo desconocía. Limitado por su perspectiva macroscópica, el botánico sueco arrumbó en su catálogo a los seres vivos más abundantes, los

microorganismos. En su escalada clasificatoria, Linneo se detuvo a la altura de reino. Admitió tres: las plantas, los animales y los minerales. No creó un contenedor mayor que comprendiera a los dos primeros. A simple vista parecía imposible identificar un criterio que hermanara a ambos.

A menudo en ciencia ordenar supone el primer paso para comprender. Empero, las clasificaciones de los viejos naturalistas no podían trascender una observación superficial, por sagaz e informada que fuera. Se habían impuesto el desafío de hallar el principio organizativo seguido por Dios en su creación. Por descontado, las arbitrariedades o los caprichos no se contemplaban en una obra que, de modo axiomático, se consideraba perfecta. Partían del supuesto de que las especies que más se parecían se hallaban más íntimamente relacionadas, de que existía una afinidad genuina cuyo fundamento ellos debían desentrañar. Todo el intríngulis radicaba en cómo definir con razonable objetividad el significado del verbo «parecerse» y cómo conjugarlo científicamente a través de los distintos niveles. En la tarea, los seres vivos, lejos de ayudar, planteaban arduos rompecabezas. ¿La verdadera afinidad debía establecerse en función de la can-



tividad de rasgos compartidos o de su naturaleza? ¿Una ballena se parece más a un tiburón o a un chimpancé? ¿Los murciélagos poseen más rasgos en común con las palomas o con los elefantes? Linneo sacó a las ballenas de la casilla de los peces y a los murciélagos de la de las aves, donde los habían metido otros estudiosos, porque amamantar le pareció una coincidencia más relevante que disponer de aletas o alas, que surcar el océano o el cielo. Por otro lado, organizó las plantas de acuerdo con un sistema tan sencillo como caprichoso, según el número de estambres y la distribución de los pistilos. Como resultado, tuvo que crear

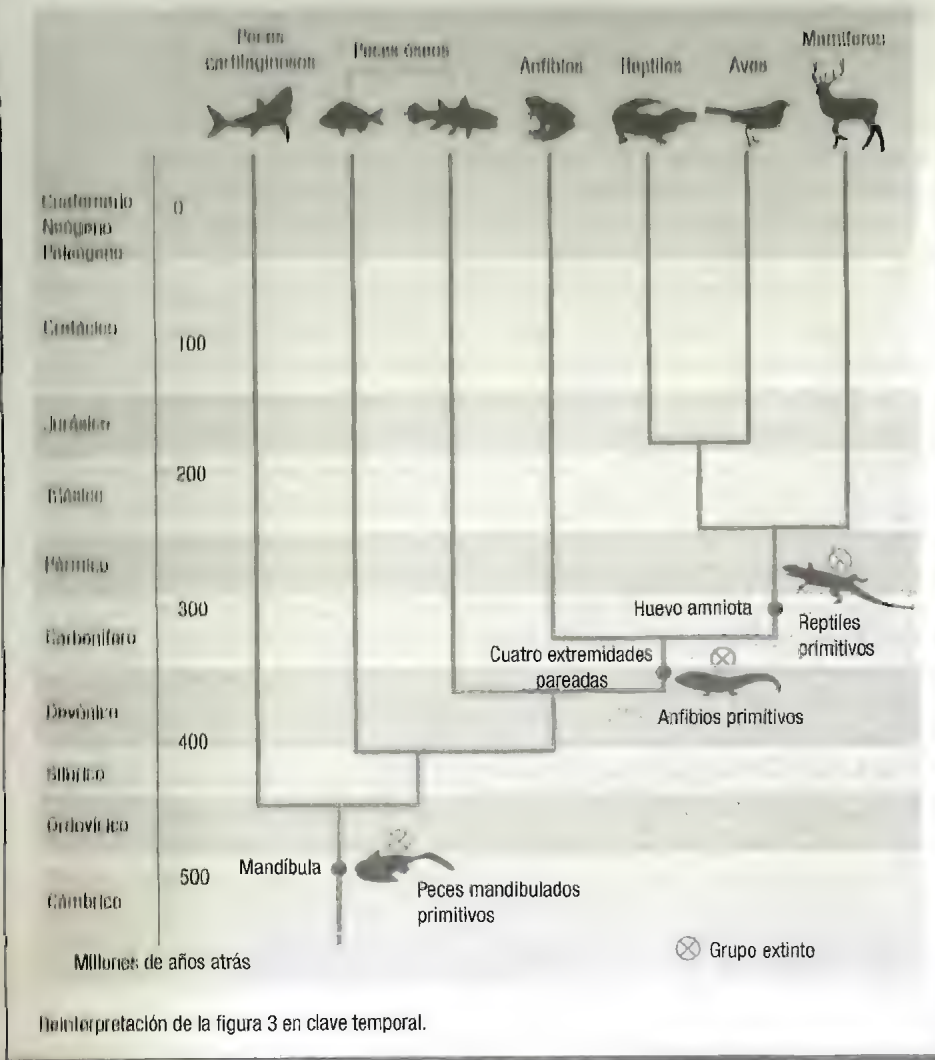
un artificioso cajón de sastre donde guardar todas las plantas sin flores, a las que distinguió con el bello nombre de criptógamas (en latín, *cryptogamae*, de «unión escondida»). Allí, en un *tótum revolutum*, coincidían líquenes, helechos, algas, musgos y hongos.

Otros naturalistas plantearon sus clasificaciones concediendo una importancia vertebral a otros criterios. Unos ordenaban los mamíferos atendiendo a los dientes; otros, a los pies. Pusieron a prueba su erudición y su instinto taxonómico tratando de separar el grano de la paja, los atributos significativos de los accesorios, intentando dilucidar la verdadera afinidad, con resultados dispares. Cada uno juzgaba sus propias opciones como naturales y motejaba las de los demás de artificiosas, pero, al terminar de montar el puzle, siempre sobraban piezas que no se sabía muy bien dónde encajaban. Ninguno conseguía dar con principios incontestables, susceptibles de abarcar por completo la diversidad de la vida.

Ni la disección más minuciosa les hubiera revelado la clave que andaban buscando, ya que se escondía a nivel celular o incluso molecular. Ciertamente Linneo no podía sospechar la íntima conexión entre sus dos grandes reinos de seres vivos, las plantas y los animales. ¿Cómo iba a verlos como modos diversos de jugar con el patrón de la célula eucariota? Darwin y la biología molecular mostraron, el primero, que la hercúlea labor de clasificación de todos los seres vivos no exige en realidad un inventario, sino una genealogía, y la segunda, que los parecidos se deciden comparando genomas. El quid para determinar afinidades y diferencias no se desprende del repertorio de formas, de sistemas de reproducción o de *modi vivendi* de los organismos actuales: se halla enterrado en su pasado —donde fueron madurando las diferencias, en ancestros que las propagaron a través de sus respectivos linajes— y en los genes. A ojos de Linneo, la jerarquía de reinos, órdenes y especies obedecía a la inventiva de un demiurgo que, como un compositor de ópera, se había dedicado a crear motivos, sobre los que luego había ido ensayando variaciones, a las que había impuesto variaciones menores, y así sucesivamente. Llegó a decir: «Dios crea, Linneo organiza».

La evolución propone una explicación menos caprichosa, que descubre en la gradación de las categorías la obra del tiempo y de la herencia. A la hora de relacionar especies, sustituye el criterio «parecerse» por el de «tener un último ancestro común más o menos reciente». Dado que los rasgos comunes se heredan, las diferencias significativas delatan linajes diferentes. Desafiando la intuición de un taxonomista del siglo XVIII, los cocodrilos «se parecen» más a los colibríes que a los camaleones, porque el último ancestro que comparten con las aves es más reciente que el que comparten con los lagartos.

La evolución toma la estructura en árbol de la figura 3 y proyecta sus ramas a lo largo de una dimensión nueva: el tiempo (figura 5). Los rasgos compartidos reflejan entonces las líneas de herencia comunes. Las más largas, que corresponden a las cualidades más difundidas, son las más antiguas y distinguen las categorías más amplias. Las definen atributos que se materializaron en antepasados muy remotos. Su legado genético, tras sobrevivir miles de millones de años, ha producido los linajes más fecundos. Es posible acomodar una amapola, un piojo, una levadura y un radiolario dentro de un mismo y gigantesco contenedor, el de los eucariotas, porque todos ellos proceden del mismo antepasado, una célula simbiótica que conjugó dos procariotas, una arquea y una bacteria. Todos heredaron de ella la organización celular que los hermana. Las plantas proceden de un accidente posterior, en el que una descendiente de la primera célula simbiótica incorporó un segundo tipo de bacteria, en este caso fotosintética. Tanto un ginkgo como un helecho o una zarza pertenecen a su estirpe. La esencia voluble de la transmisión genética, sumada a la inconstancia de las exigencias del entorno y a la implacable poda de la selección natural rectifican la herencia sin cesar, inaugurando líneas secundarias. Cada nuevo rasgo definitorio que se concreta, como el sexo, la bilateralidad, la floración, la posesión de un exoesqueleto o de una columna vertebral, se expone al mismo proceso de enmiendas sucesivas. Así el tiempo y la herencia van modelando sus muñecas rusas. Cualquier categoría que concibamos es fruto de un acontecimiento histórico. La evolución explica su origen a la vez que revela la



consanguinidad de todas las especies. Sus divergencias surgen con arreglo a una cronología, aunque no siempre podamos reunir la información necesaria para reconstruirla.

La narración evolutiva admite una representación ramificada. Darwin adaptó la imagen del árbol de la vida que habían usado otros naturalistas, como Buffon o Augustin Augier, aunque, en una muestra de prudencia, lo mantuvo en un plano teórico, sin escribir bajo sus ramas el nombre de ninguna especie. Sabía bien que no disponía de datos suficientes para resolver genealogías con seguridad y no quería que un desmentido en los detalles acabase por cuestionar la idea de fondo. El árbol de la vida brota y crece bajo el principio de la «descendencia con modificación». Al rebobinar la película de su desarrollo, las puntas, donde se sitúan los seres vivos actuales, desaparecen. A medida que las ramas se retraen, asoman organismos nuevos, que nunca hemos visto germinar, duplicarse o respirar; solo conseguimos entrever unos pocos, a pesar de la niebla del tiempo, gracias a los fósiles. Al menguar, las distintas ramas convergen en tallos más profundos, que ocupan animales extintos, que, a su vez, se repliegan y convergen en especies aun más antiguas. El viaje a la raíz conduce al origen mismo de la vida. La presencia de cualquier rasgo colectivo se puede rastrear hasta alcanzar un antecesor común de todas aquellas ramas o especies que lo comparten, donde apareció. Si lo rebasamos, esos atributos se desvanecen, se esfuman las flores, los exoesqueletos quitinosos, las extremidades. Si seguimos retrocediendo, las diferencias se desdibujan, en criaturas antiquísimas que barajaban un repertorio mucho más reducido de características. Los seres pluricelulares terminan por disolverse en tres grandes categorías de células: bacterias, arqueas y eucariotas. Estas últimas se diluyen en bacterias y arqueas, que se cruzan infatigablemente a partir de un antecesor común.

En la superficie de la copa del árbol, la proximidad implica rasgos compartidos. Si nos sumergimos un poco en el follaje, comprobaremos cómo las ramas cercanas confluyen enseguida, porque sus divergencias se fraguaron hace poco. La jerarquía de la vida que trataron de levantar Linneo y otros insignes naturalistas solo consideraba las puntas de las ramas más externas. Las conexiones que buscaban resultaban inencontrables porque no se desplegaban ante sus ojos, sino hacia el pasado. Habían

LA RIBUPCIÓN DE LO INESPERADO

Los seres son natural y legalmente perfectos en sus defectos, que los hacen capaces de adaptarse a los ambientes. Las alteraciones, sean físicas o fisiológicas, no deben ser necesariamente perjudiciales. Las alteraciones de la copia del ADN, trasmitidas o heredadas, pueden ser de continuo. Sin embargo, la capacidad del trabajo evolutivo admite, muy de tarde en tarde, novedades que llegan por las mutaciones. Las extinciones masivas son un fuego esporádico en el jardín de las especies, que reduce la diversidad única con ancestral padecida por la selección natural. A lo largo de la historia también se han producido «catástrofes avarosas», epifenos casuales que han multiplicado las opciones evolutivas mediante la intromisión, brusca y en absoluto gradual, de elementos inesperados.

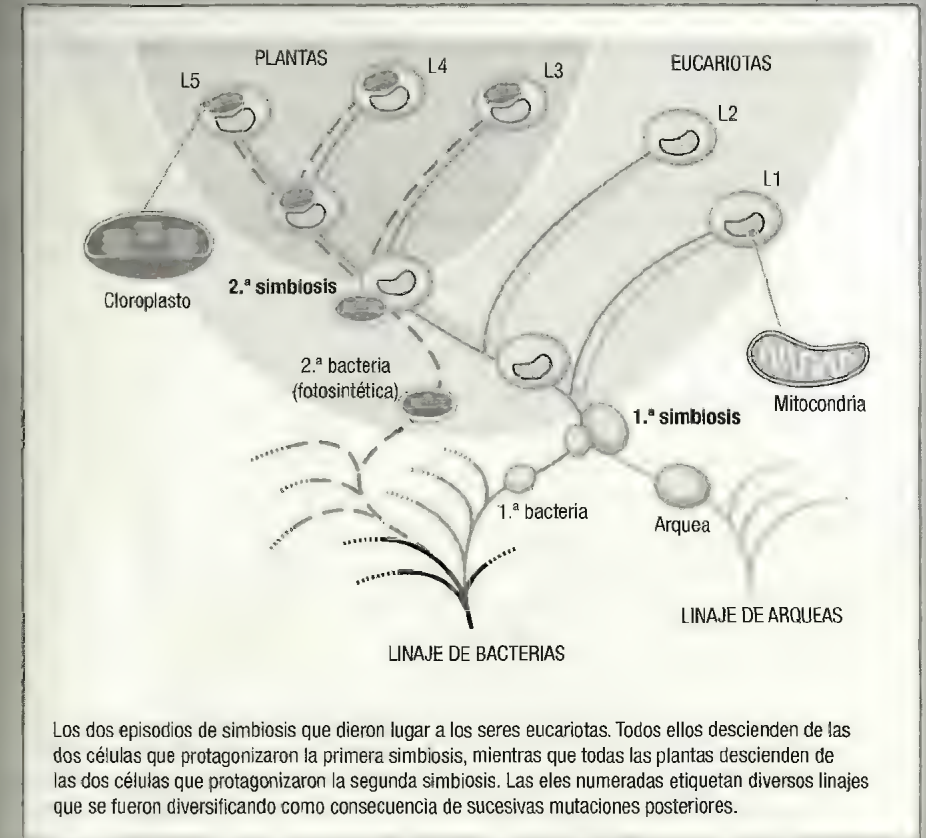
Humo a lo complejo

Seguimos a un hilo la espinosa cuestión del origen de la vida: el incidente más productivo correspondiente al surgimiento de las células eucariotas. Las procariontes (bacterias y arqueas) son la columna vertebral de la biología: apenas han cambiado en el curso de cuatro mil millones de años. Funcionan en un diseño celular tan eficaz como simple, que no hay modo de mejorar el primer paso, por medio de mutaciones aleatorias sucesivas. La complejidad es patrimonio exclusivo de las células eucariotas y sobrevino en virtud de dos asociaciones simbióticas. En la primera, una arquea asumió una bacteria, que sería el germen de las mitocondrias. Más adelante, una segunda bacteria, esta vez fotosintética, se incorporó al producto de la combinación anterior, sentando las bases de los cloroplastos (véase la figura). Los intrusos bacterianos acabaron convertidos en centrales energéticas que revolucionaron la arquitectura celular, dando origen a una escalada de complejidad que daría pie, entre otras cosas, a todos los linajes de seres pluricelulares. Los detalles de estos sucesos han sido objeto de acalorados debates, pero nadie discute la excepcionalidad de los episodios simbióticos. Si hubieran lugar otros, fracasarían sin dejar huella.

Cynn Marquis fue la gran impulsora de la hipótesis del origen simbiótico de las células eucariotas, sobre la que habían trabajado otros científicos, como Andreas Melnikoff, Constantin Melnikovski o Ivan Wallin.

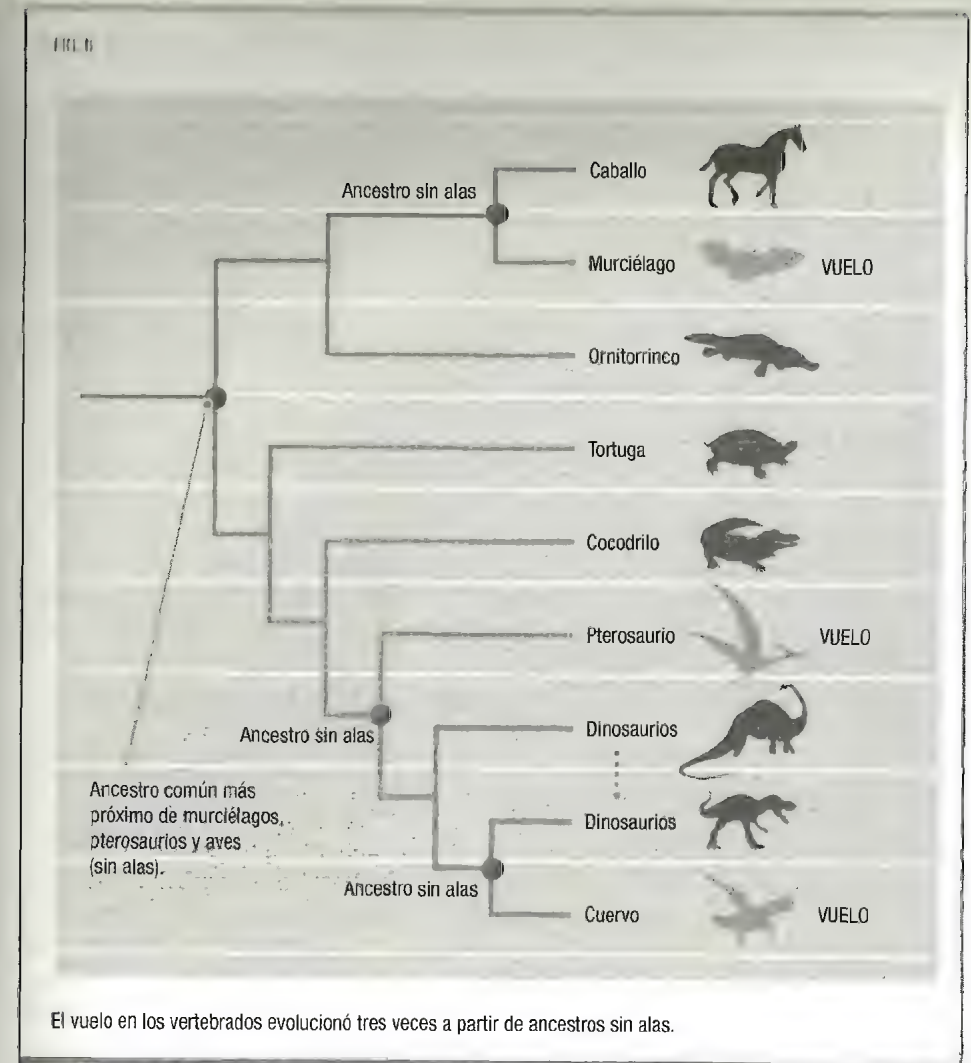


Los cambios singulares no son exclusivos del vertedero de la selección natural. Pasaron la criba porque durante el principio proporcionaron ventajas a las células afectadas. Con el tiempo, estas especies sobrevivieron, mejoraron y mejoraron los frutos de las simbiosis. Otros accidentes de menor impacto climático han condicionado también la historia evolutiva al margen de la acción gradual de los errores de copia. Las arqueas y bacterias, sin ir mas lejos, intercambian con relativa frecuencia paquetes genéticos completos. Encontramos otro ejemplo en la constitución de una peculiar colección de genes que definen los planes anatómicos de los animales y que restringen su evolución. Habiaremos de ellos en el último capítulo. La selección natural no crea, reacciona. Y lo hace frente a cualquier novedad, sin reparar en su probabilidad, ya sea vulgar o extraordinaria.



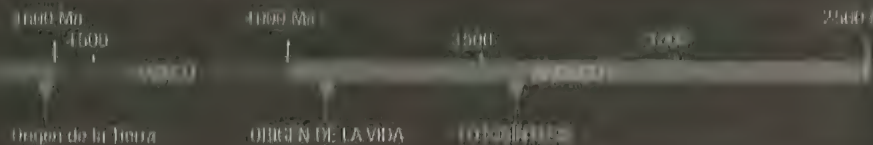
desaparecido. A su ambición compendiadora en realidad le faltaba aliento, ya que estaban dejando de lado la mayoría de las especies: las que se han extinguido. El cuerpo del árbol de la vida, como el del gato de Cheshire, se ha desvanecido casi por completo. Las especies cuyas singularidades establecieron los grandes órdenes son espectros que ya solo rondan los genomas. La interpretación genealógica, más perspicaz, permite deshacer algunos equívocos que provocan las apariencias. En el caso de un cuervo y de un avestruz, que no vuela, las alas ofrecen un buen criterio para hermanarlos porque ambas especies heredaron esta estructura de un antepasado común (figura 6). No obstante, las alas sugieren un parentesco estrecho engañoso entre el murciélago y el gorrión, porque su ancestro común más próximo carecía de ellas. El vuelo se ha inventado al menos cuatro veces a partir de organismos sin alas, en los insectos, los mamíferos, los pterosaurios y las aves. En el extremo opuesto, se sitúan aquellos organismos que ocultan un vínculo inmediato. El maíz es un descendiente directo del teocinte, parentesco que encubren diferencias significativas en su aspecto (y que desenmascara el análisis de sus genes).

Un malentendido frecuente fuerza en las relaciones superficiales una grosera perspectiva temporal. La figura 5 podría dar a entender que las ranas y los sapos surgieron antes que las serpientes, los colibríes y los ciervos. Las sardinas, antes que las ranas. De ahí a concluir que los peces están menos evolucionados que los anfibios, estos que los reptiles, y así sucesivamente, solo media un paso. Sin embargo, las especies no detienen su reloj evolutivo por adoptar una característica que se propague con éxito a través de una larga cadena de descendientes. La lectura correcta de la figura es que el último antecesor común de los anfibios y los reptiles surgió antes que el de los reptiles y los mamíferos. Y desde luego, los anfibios actuales no son los animales que conquistaron una cierta independencia del agua en el Devónico ni los reptiles modernos son los artífices del huevo amniótico que eclosionó por primera vez en el Carbonífero. Igual que los mamíferos actuales tampoco son las diminutas criaturas que correteaban bajo los pies de los dinosaurios, con los cinco

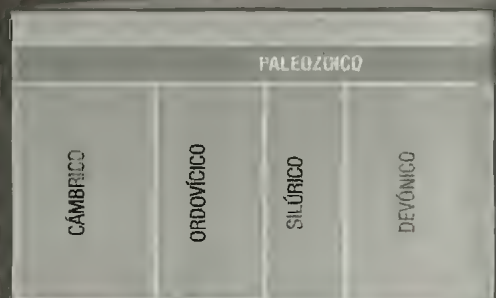


sentidos puestos en que no los pisaran. Las truchas y los arenques tampoco nadaron en las aguas del Devónico, periodo en el que se fundó la clase de vertebrados a la que pertenecen, los peces actinoptergios (con extremidades formadas por espinas). Podemos considerar que los animales que inauguraron estos

ORIGEN DE LA VIDA

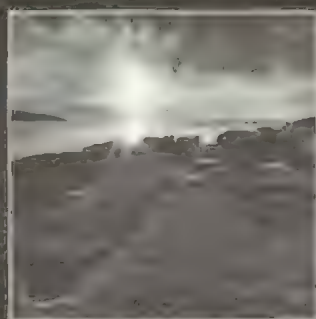


Existen infinitas rutas posibles de hitos evolutivos que se recorren algunas de las más populares dentro de la literatura científica. La selección muestra el camino de la perspectiva humana, aunque no se trata particularmente de la aparición de los primates. De modo implícito, los hitos marcados parecen indicar una trayectoria de crecimiento complejo, cuya proyección natural apuntaría a la aparición del cerebro del *Homo sapiens*. Sin embargo, centrar el interés en otro hito cualquiera de la evolución daría lugar a una lista diferente. Muchas de las fechas están sujetas a constante revisión, a medida que nuevos hallazgos permiten reconstruir con mayor precisión la cronología de la vida.



ORIGEN DE LA VIDA

Uno de los escenarios más plausibles del origen de la vida en la Tierra son los fondos hidrotermales submarinos, que abundan cerca de las regiones donde las placas tectónicas provocan actividad volcánica.



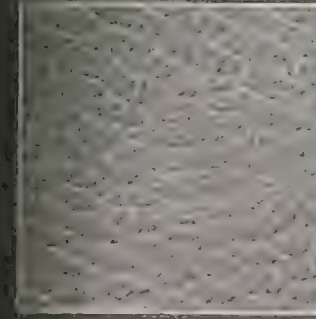
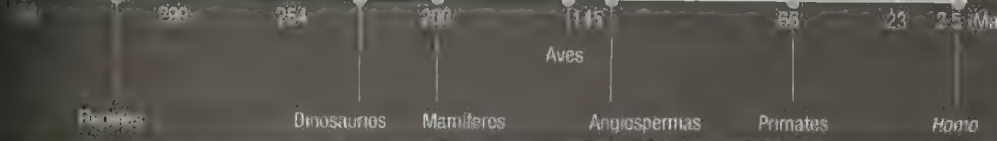
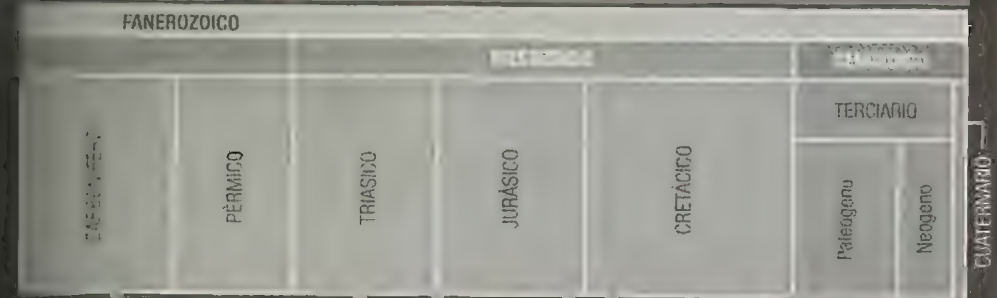
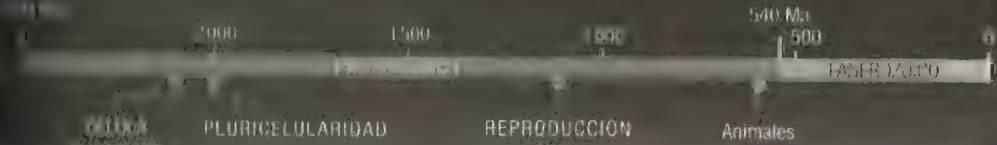
FOTOSÍNTESIS

Las bacterias desarrollaron la fotosíntesis, que legaron su descubrimiento a los eucariotas. Las primeras formas de fotosíntesis no empleaban agua para crear materia orgánica ni desprendían oxígeno.



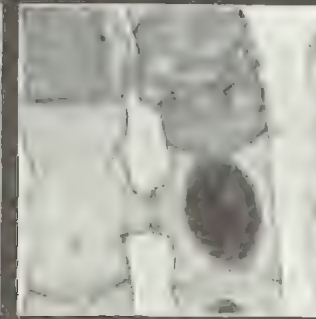
CÉLULA EUCARIOTA

El dominio exclusivo de los seres procariotas sobre la vida del planeta duró cerca de dos mil millones de años y lo liquidaron ellos mismos, mediante la simbiosis entre una arquea y una bacteria.



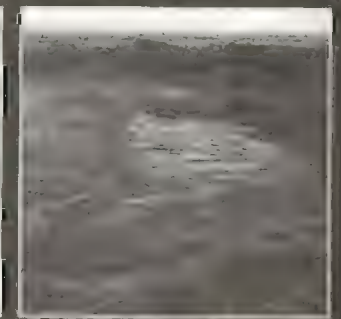
PLURICELULARIDAD

La inventaron los eucariotas en varias ocasiones, de modo independiente. Hongos, algas y protistas unicelulares hallaron su propia manera de organizarse en organismos más complejos.



REPRODUCCIÓN SEXUAL

Es la forma de reproducción más extendida entre los organismos eucariotas. Se cree que la heredaron de un único ancestro unicelular, aunque luego diversos linajes la abandonaron.



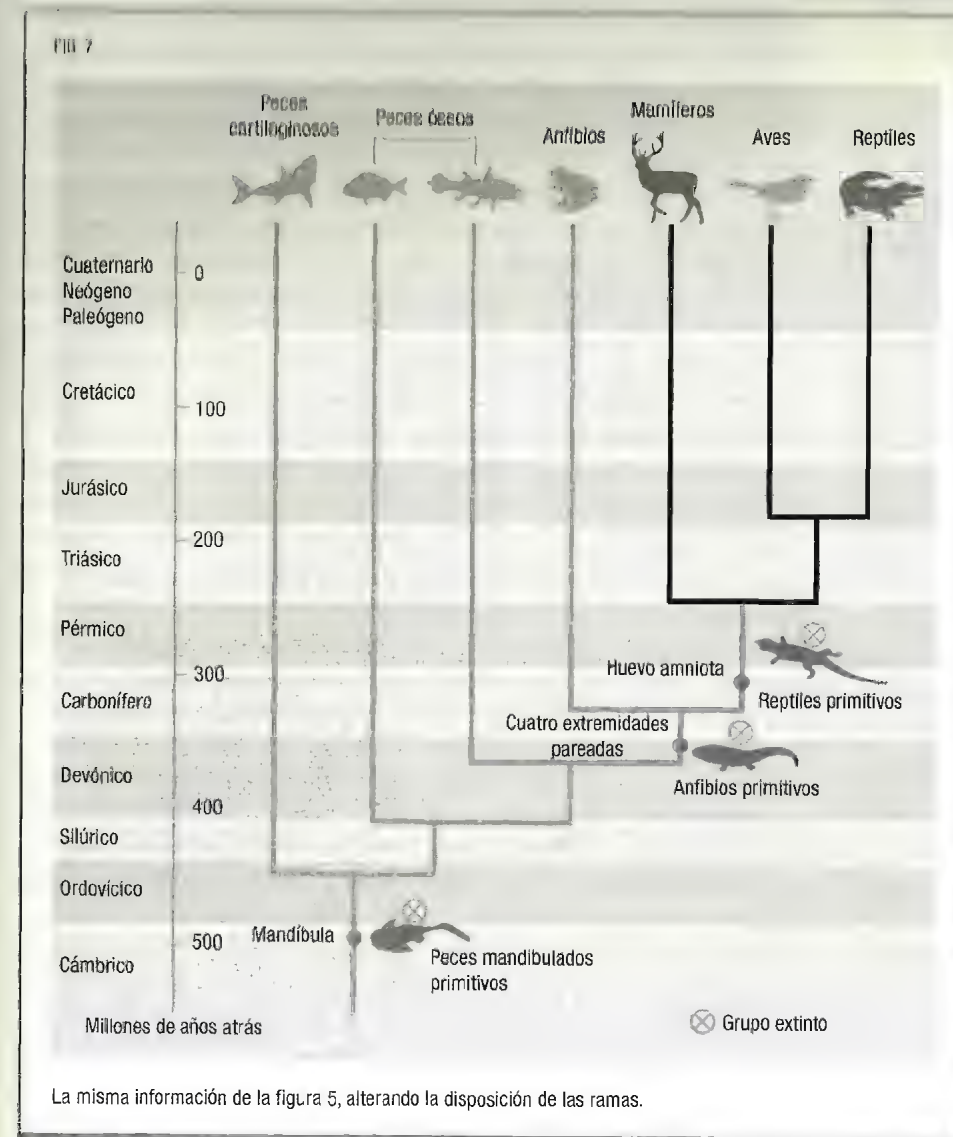
CONQUISTA TERRESTRE

Seguramente los hongos ayudaron a las plantas primitivas a afianzarse en el nuevo medio, mediante simbiosis. Los primeros animales terrestres serían artrópodos parecidos al ciempiés.

grandes grupos contribuyeron con innovaciones duraderas, que sus descendientes han conservado y sobre las que han seguido introduciendo variaciones de menor alcance.

Los anfibios, los peces o los reptiles, al igual que las lombrices, los moscos o las bacterias, no están menos evolucionados que los seres humanos. Todas las especies actuales mantienen sus programas de adaptación, a un ritmo más o menos pausado, según sus posibilidades y los retos que les proponga su mutable ecología local. Los linajes, por rancio que sea su abolengo y exitosos que hayan sido los atributos biológicos que los caracterizan, continúan sufriendo el azote de las mutaciones, de un entorno cambiante y de la selección natural, que los rectifican sin cesar. Un aspecto crucial, que no recoge la figura 5, son las ramas correspondientes a las especies extinguidas, que heredaron rasgos propios de los anfibios, los reptiles o los peces y que no lograron prolongar sus linajes hasta el presente. Esta ausencia proyecta una falsa impresión de finalidad sobre los supervivientes, como si los pasos adaptativos hubieran ido quemando etapas para llegar a los anfibios o los reptiles. Un proceso que parece coronar el advenimiento de los mamíferos. No obstante, muchos peces actuales son tan modernos como los primates. Cambiar la disposición de las ramas no altera la información del diagrama y deshace la ilusión que presenta a los mamíferos como la última parada (figura 7).

El huevo amniota no fue un trámite evolutivo para llegar hasta los reptiles que conocemos hoy en día. Caracterizó a otros muchos animales que no han dejado siquiera huellas en el registro fósil. Las plumas o los sacos aéreos que asociamos exclusivamente a las aves fueron también propios de los dinosaurios. Conviene recalcar que estos hallazgos, que a veces se disponen en una secuencia temporal, no se impusieron como una marea siempre creciente. Se produjeron vacilaciones. A medida que el árbol de la vida se escinde en nuevas ramas, no siempre lo hace bajo el impulso de lo que entendemos como innovaciones. Hay linajes que prueban las novedades durante un tiempo y luego las descartan, cuando las condiciones ambientales así lo aconsejan. La adquisición de un rasgo puede revelarse utilísima en ocasio-



nes y volverse un estorbo ante una mudanza del entorno. Hace unos quinientos millones de años, los antepasados de los mixines —una especie de peces anguilliformes que serpentean por el

fondo del océano Atlántico — se desprendieron del cristalino que habían heredado. Su visión empeoró. Quizá no fuera una gran pérdida en la penumbra de las profundidades marinas. A cambio, guiaron recursos energéticos que destinaron a otros menesteres más acuciantes.

La vida presente es consecuencia de la vida pasada, pero eso no implica que el proceso evolutivo tenga como fin producir las especies que ahora ocupan la Tierra. Puestos a buscarle propósitos, también tendría como objeto crear los organismos que se extinguieron. La mayoría no se pueden considerar siquiera como eslabones de la cadena que conduce desde las primeras células hasta las especies actuales. Compartieron ancestros con ellas, pero siguieron rutas alternativas que se interrumpieron más o menos bruscamente. Muchas lo hicieron a causa de accidentes que no dejaron margen a la adaptación, como sucede en las extinciones masivas debidas a algún cataclismo ecológico. La historia evolutiva recuerda a menudo a las guerras cruentas. Quienes sobreviven no son los mejor adaptados, aunque, frente a los golpes del azar, determinadas características se revelan providenciales (¿cuáles?, rara vez hay modo de saberlo *a priori*). No existen linajes afortunados que dieron con el secreto del éxito, tan solo linajes que subsistieron.

Bajo ese prisma, se puede considerar a las bacterias como las grandes protagonistas de la evolución en nuestro planeta. Interpretaron, como quien dice, los primeros compases de la vida y su estirpe ha colonizado casi hasta el último rincón de la superficie terrestre, incluidos nuestros cuerpos. Han sobrevivido a todas las extinciones y ni siquiera el peor holocausto nuclear lograría erradicarlas. Hasta los eucariotas pluricelulares, como las plantas o los animales más sofisticados, insertan piezas bacterianas vitales en el corazón de su engranaje celular, que heredaron de una bacteria del Proterozoico. Y desde luego, las bacterias del Mesozoico o del Paleozoico no son las mismas que han desarrollado la resistencia a la penicilina o la eritromicina.

La ausencia de detalles sofisticados no se debe confundir con una evidencia de antigüedad. El nacimiento de variedades inéditas de seres vivos no borra del mapa las anteriores, circunstan-

cia que se aprecia tanto en el largo como en el corto plazo. Muchas especies que asociamos a etapas sucesivas de un proceso evolutivo en realidad fueron contemporáneas. Nada prohíbe que una especie conviva con su ancestro. La herencia se transmite, cierto, pero los beneficiarios tarde o temprano la transforman. Con el paso del tiempo, nadie permanece quieto en la foto evolutiva. Eso es todo. Ancestro y descendiente seguirán sus metamorfosis, cada uno a su ritmo, generando nuevas variaciones de mayor o menor trascendencia o extinguiéndose.

Con el paso de miles de años, la incapacidad de los seres vivos de preservar intacto su legado genético produce la impresión de que las especies se repelen entre sí, como si quisieran separarse y diferenciarse lo más posible. ¿Cómo procede exactamente la especiación o génesis de nuevas especies? A pesar de lo que pudiera sugerir el título de su obra más popular, fue una pregunta a la que Darwin no supo responder.

El origen de las especies

En el catálogo de las especies, constantemente se borran páginas y se escriben otras nuevas. Reinventarse sin descanso deja en el camino una especie tras otra, adaptada cada una a un cúmulo particular de condicionantes. Para sorprender el truco de la metamorfosis evolutiva hay que atender a detalles minúsculos. Y, a la vez, no perder de vista el cuadro general.

Uno de los grandes triunfos de la física del siglo XIX fue la construcción de la termodinámica, que conoció dos etapas. En la primera, los pioneros de la disciplina formularon tres grandes leyes sobre el comportamiento de la materia, que dedujeron del estudio de los gases, ignorando por completo los detalles acerca de su estructura interna. Hasta el punto de que algunos estaban convencidos de que no existían los átomos. Décadas después, los mismos principios se reinterpretaron a la luz de modelos estadísticos cada vez más sofisticados. Se comprendió entonces cómo las leyes surgían de una capa más profunda de realidad, de la actividad colectiva de trillones de moléculas y átomos. La concepción de la teoría de la evolución ofrece un interesante paralelismo. Darwin y Russel Wallace la desarrollaron en un momento en el que solo se podía arañar la superficie de los seres vivos. Se apoyaron en abundantes evidencias macroscópicas, como la distribución geográfica de las especies, la cría y cultivo selectivos de animales y plantas, los fósiles o la anatomía comparada. Sin embargo, desconocían el mecanismo subyacente. Para averiguar cómo operan los engranajes que transforman una aleta en una pata o un dinosaurio en un ave hay que dejar atrás el territorio

que exploran los sentidos y viajar al núcleo de las células. El motor de la evolución reside en los genes.

El genoma comprende el conjunto de todos los genes de un organismo. Los seres humanos suman cerca de veinte mil que codifiquen proteínas, marca que baten ampliamente la vid o la

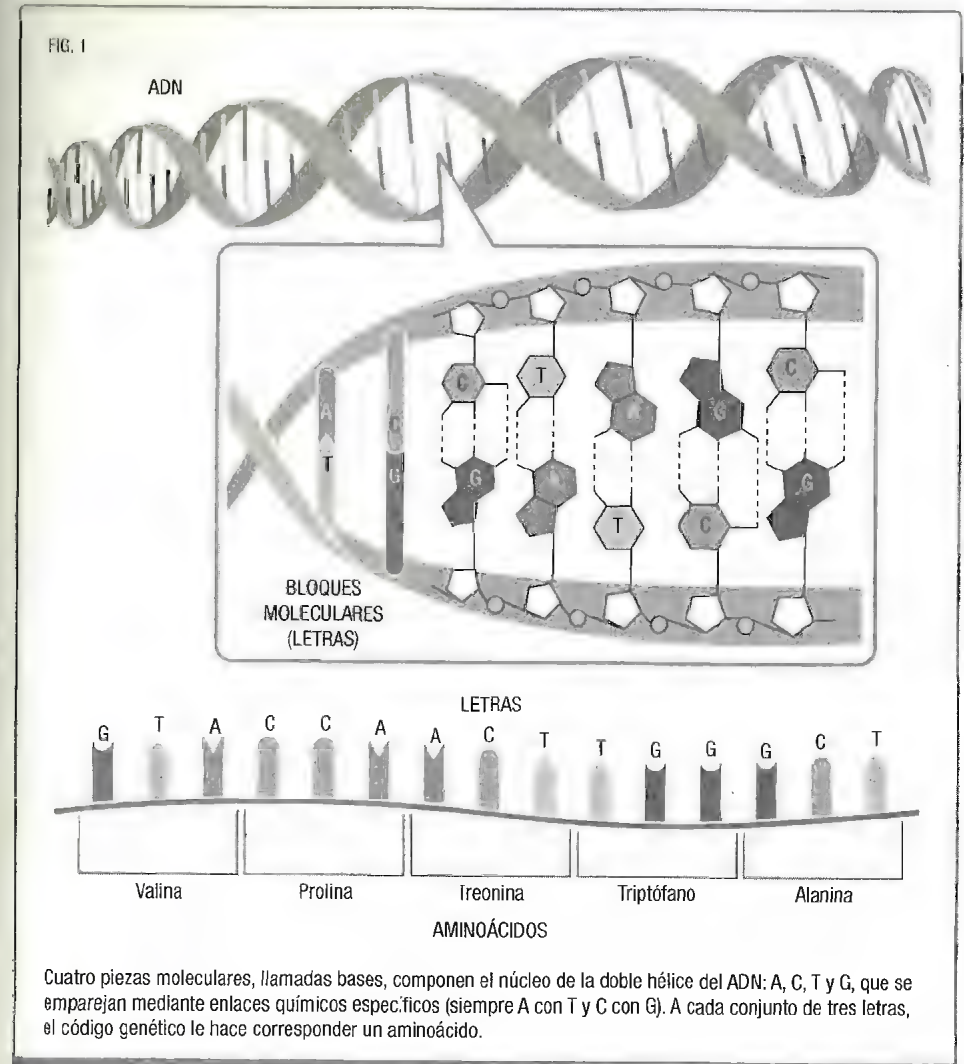
Lo que es cierto para *E. coli*
también es cierto para el elefante.

JACQUES MONOD

Los seres unicelulares albergan una sola copia del genoma, mientras que los pluricelulares transportan una réplica exacta en cada una de las células de su cuerpo, si exceptuamos aquellas que hayan sufrido mutaciones o ciertas células especiales a las que el azar evolutivo ha privado de la carga genética, como los glóbulos rojos de la mayoría de los mamíferos. Materialmente, cada gen se encarna en uno o varios tramos de la larga molécula del ADN. Esta se fabrica ensamblando cuatro bloques moleculares distintos, que se etiquetan con las letras G, T, A y C. El código genético relaciona el lenguaje de estas letras con otro lenguaje, el de los aminoácidos, que son las unidades estructurales de las proteínas. Todas las proteínas se fabrican enhebrando aminoácidos, que pueden ser de veinte tipos diferentes. El código genético asigna un aminoácido a cada serie consecutiva de tres letras. Traduce frases del ADN, del tipo GTA CCA ACT, en frases de aminoácidos (proteínas), como valina-prolina-treonina (figura 1).

El proceso de la traducción convierte una secuencia de letras del ADN en una sarta de aminoácidos, es decir, en una proteína. Un orgánulo de la célula, el ribosoma, se encarga de ir leyendo la tira de letras, de tres en tres, con la ayuda de unas moléculas-diccionario, que van suministrando uno detrás de otro los aminoácidos correspondientes a cada terna (figura 2). El genoma, por tanto, proporciona un manual para montar proteínas. Todas las células del planeta Tierra disponen de ribosomas y utilizan como referencia el mismo código genético. Si se extrae una secuencia

del ADN de un elefante y se inserta en el ribosoma de una polilla, la célula del insecto producirá sin titubeos las proteínas del elefante. Ocurriría lo mismo si se recurriera al ribosoma de una arquea o de un hongo. Ya en 1978 los ingenieros genéticos pusieron a la bacteria *Escherichia coli* a su servicio, haciendo que



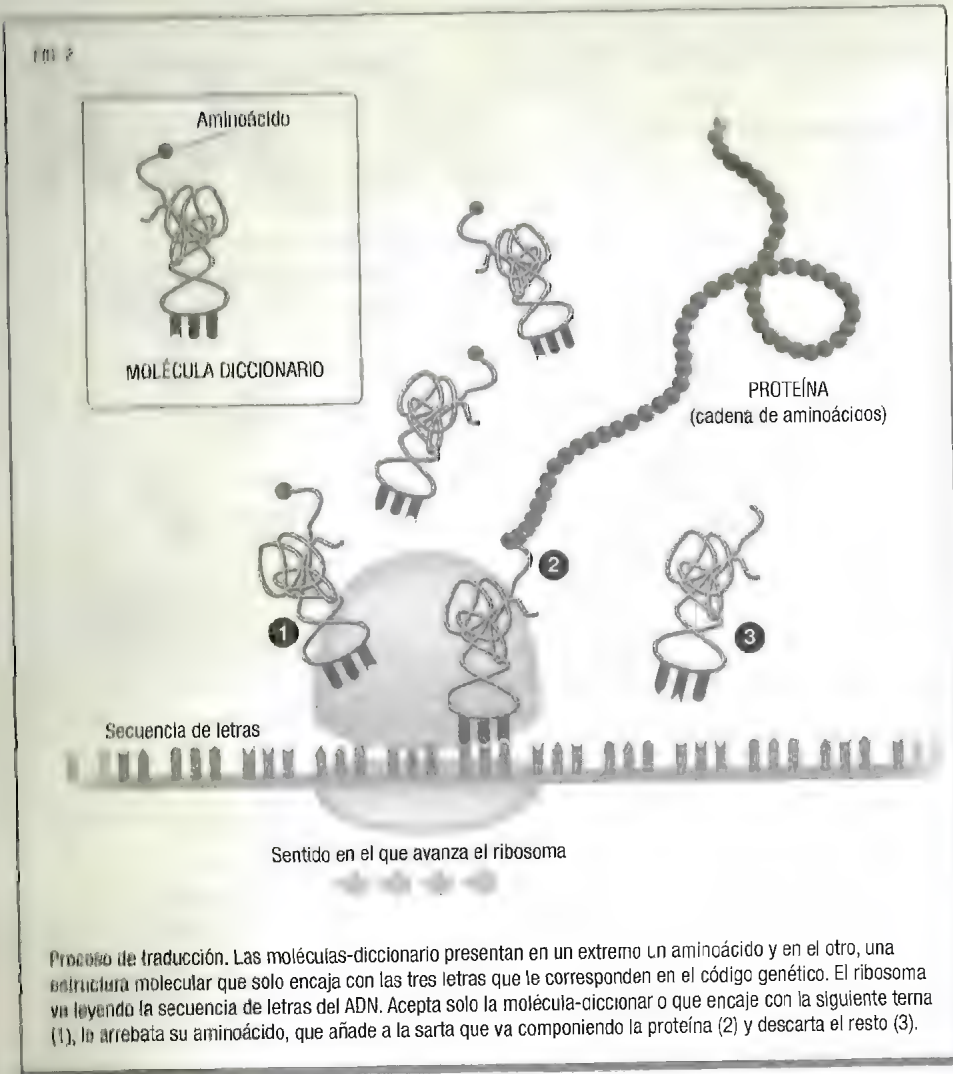
elaborase insulina humana. Todos los seres vivos son bilingües, entienden la lengua del ADN y la de los aminoácidos y pasan de una a otra con fluidez. Esta asombrosa universalidad constituye una rotunda evidencia en favor de un ancestro común para todos los organismos conocidos. El código genético se inventó una

sola vez y todas las células que vinieron después lo heredaron a través de diversos linajes, que tuvieron que brotar de la misma raíz. Las probabilidades de que las especies procedan de estirpes independientes que desarrollaron por puro azar el mismo lenguaje resultan desdeñables.

EL SECRETO ESTÁ EN LOS GENES

A menudo, el genoma se describe como el conjunto de instrucciones que hay que seguir para construir un organismo o mantenerlo en funcionamiento. Esta definición, de carácter orientativo, resulta algo imprecisa y hasta engañosa. El ADN no facilita la receta a ningún robot celular para que, de cero, vaya ensamblando piezas moleculares y arme, como un mecano, seres vivos. Estos surgen en gran medida con material ya prefabricado que la célula madre aporta a la hija. Como acabamos de señalar, el genoma contiene otras recetas, para fabricar proteínas, que, eso sí, determinan por completo la actividad y el carácter de la célula que porta las instrucciones. A su debido tiempo, veremos hasta dónde puede llegar la magia de las proteínas, en el desarrollo embrionario, por ejemplo. Hasta entonces, aceptaremos la visión simplificada, y algo inexacta, del genoma como receta para elaborar seres vivos.

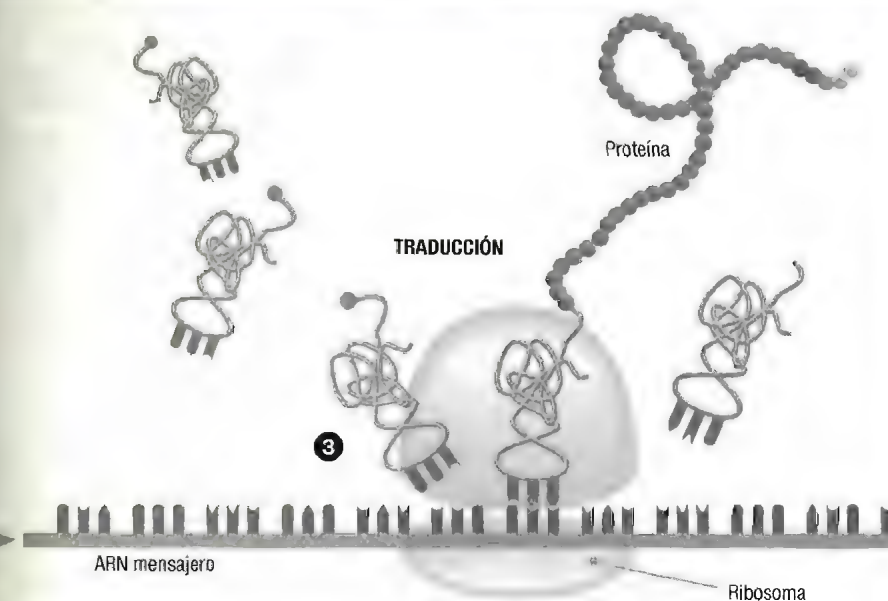
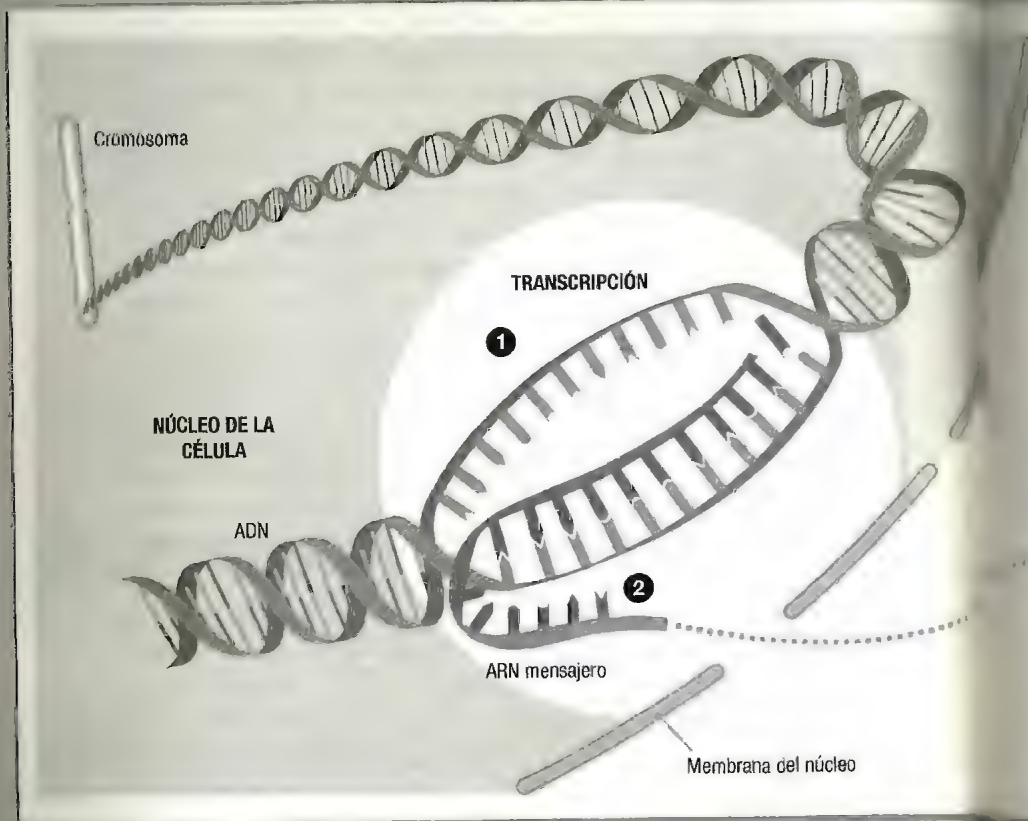
Partiremos del supuesto de que modificar los genes, igual que alterar cualquier paso en una secuencia de instrucciones, puede repercutir en la constitución del organismo que los hereda. Genomas distintos originarán, en principio, individuos diferentes. En muchas especies, una serie de atributos, como el tamaño, la forma, la pigmentación o el olor permite identificar a sus miembros. Las pirañas o los lobos no se dispersan por el mundo como el ejército de clones creado por un científico loco (o como hacen ciertas plantas y bacterias). Cabe inferir, por tanto, que no surgen de instrucciones idénticas. Y, en efecto, a la hora de componer el genoma de un organismo se puede escoger entre varias versiones (alelos) de muchos genes. Esta riqueza en la oferta génica justifica la diversidad de los individuos. Hay, por



MI DIAS VERDADERAS

en atribuyendo al matemático Alfred North Whitehead la siguiente: «Los científicos han señalado como defectos todos los verdaderos y casi muchos verdaderos». Aquí así, hay muchas veras, las más importantes que otras y también incluidos en varias circunstancias importantes. Para empezar, los ribosomas no traducen fragmentos codificales del ADN, sino copias. Estas se montan como moldes de fotocopias de una de las hebras de la doble hélice, dando lugar a una cadena simple compuesta por los mismos bloques moleculares, salvo la letra T, que se sustituye sistemáticamente por otra misma, U. La molécula que surge de este proceso de copia o *transcripción* recibe el nombre de ARN mensajero y es la encargada de llevar la información de los genes hasta los ribosomas, lugares donde se crea el código genético es universal, lo que tampoco resulta del todo cierto. Las mitocondrias energéticas de la célula eucariota, las mitocondrias, disponen de un pequeño anillo de ADN propio, que codifica un puñado de proteínas para su uso exclusivo. Su código

constituye una variante menor. El tRNA significa «triple diano» en lugar de «dupleto». Puesto que las mitocondrias poseen una de las hebras en su código, no es de extrañar que conserven alguna información, aunque la mayor parte de su estructura y funcionamiento depende de genes alojados en el ADN nuclear. Las mitocondrias no son las únicas que manejan un código alternativo. Hay protozoos, por ejemplo, que también lo hacen. Se conocen unas quince variantes menores, que añaden otro significado a las palabras de tres letras reservadas a la orden «termina». En algunos casos se asignan a aminoácidos —como la selenocisteína o la pirrolisina— que solo utilizan un grupo reducido de seres vivos. Estas excepciones no afectan al núcleo del código y tienen un origen evolutivo. A fin de cuentas, las moléculas-diccionario se confeccionan siguiendo instrucciones del ADN, que está sujeto a mutaciones. En general, cualquier corrupción aleatoria del código genético vuelve inviable la dinámica celular. No obstante, la polisemia permite la reasignación accidental de alguna palabra, satisfaciendo necesidades puntuales de ciertos organismos.



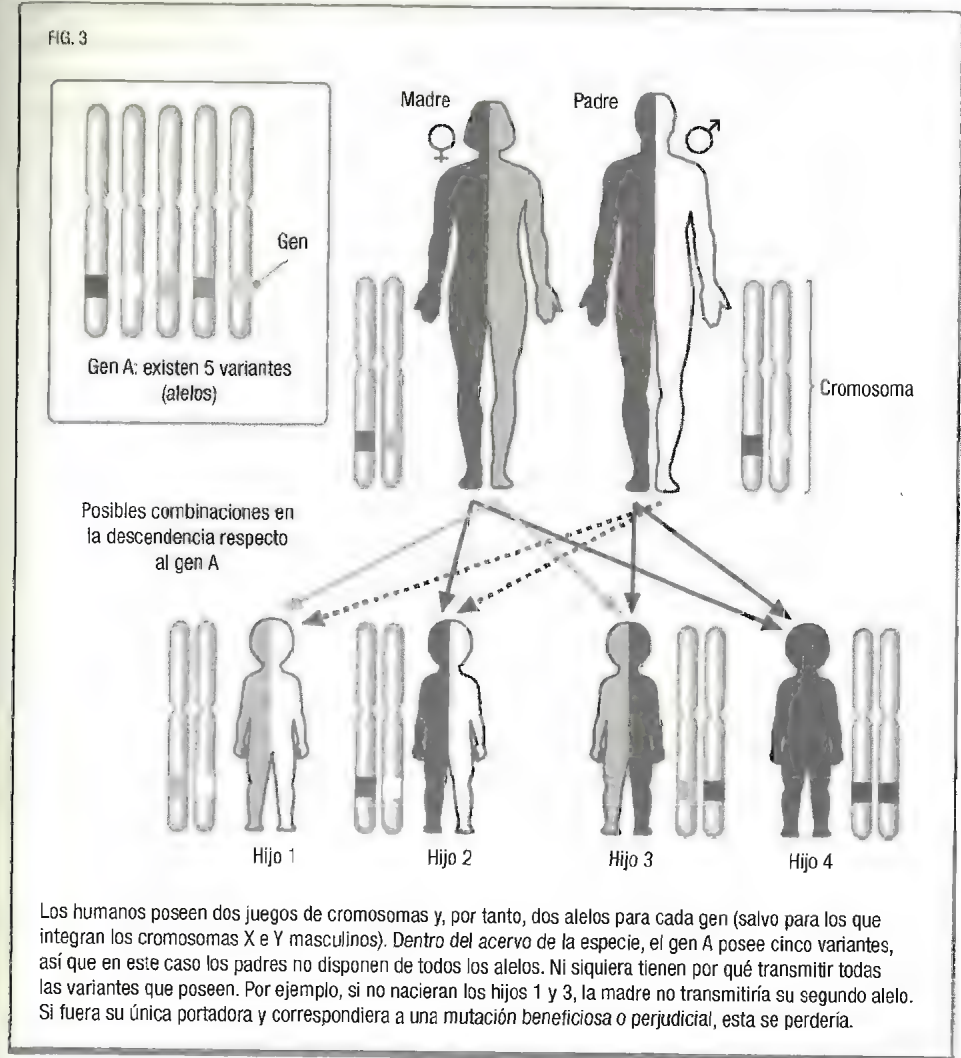
Un paso omitido: la transcripción. El ADN, que se almacena enrollado en una serie de carretes (que integran el cromosoma), expone el fragmento que codifica un gen (1). Se transcribe en el ARN mensajero (2) y la copia se traslada al ribosoma (3). En la imagen se representa una célula eucariota. El ADN se aloja dentro del núcleo, y el ribosoma, fuera de él.

ejemplo, variantes de los genes responsables del tamaño, que producen, dentro de la misma especie, ejemplares de mayor o menor corpulencia. En torno a un 20% de los genes de los vertebrados disponen de alternativas. En los invertebrados la cifra ronda el 40% (los equinodermos se llevan la palma, con un 55%); en las plantas, el 45%. Cada porcentaje es el reflejo de un pasado evolutivo diferente.

El conjunto formado, en abstracto, por toda la variedad de genes que portan los individuos de una especie constituye su acervo o repertorio génico. En los seres con reproducción sexual, que usaremos como referencia, cada organismo adquiere su genoma a partir de instrucciones que hereda del padre y de la madre (figura 3). Obtiene así su propia colección de genes en una lotería restringida, bien de un progenitor, bien del otro, y con ellos configura un genoma único (salvo en el caso de los gemelos idénticos). En general, no se debe presuponer una correspondencia biunívoca entre genes y atributos. Abundan los rasgos a cuya definición contribuyen varios genes, como el tamaño, el color de los ojos o la pigmentación, y a la inversa, un mismo gen puede tener una incidencia múltiple, circunstancia que ponen de manifiesto algunas enfermedades, en las que el defecto en un gen desencadena una batería de síntomas, como la piel clara y los trastornos motores o del comportamiento que causa la fenilcetonuria. La disponibilidad de alternativas para numerosos genes motiva una gradación en las características de los integrantes de una población, como la talla o la tonalidad del pelaje, que puede llegar a parecer continua, impresión que acentúa con frecuencia la influencia del ambiente, a través de la nutrición o de la exposición al sol, por ejemplo.

Surgen así organismos con la concha un poco más fina o más gruesa, con alas mejor o peor proporcionadas, los pétalos amarillos o azul turquesa, el pico romo o afilado. Una constelación de matices, a los que los seres humanos nos mostramos particularmente sensibles dentro de nuestra especie. Aunque seamos incapaces de advertirlo, lo mismo sucede con las anguilas, los escarabajos y las medusas. Salvo los clones, todos son ejemplares únicos. Se puede establecer una analogía algo rudimentaria

con esos cuadernos infantiles que contienen en cada página el dibujo de una persona, cortado en tres secciones, que generan numerosas combinaciones de cabezas, troncos y piernas. Un rostro con bigote, blusa y falda, da paso al mismo rostro con la misma blusa y unas piernas en pantalones cortos que juegan



con una pelota. Todas las curvas, piernas y troncos del cuadrado representarían el repertorio de una especie. En el ámbito genético, el juego opera con cientos de miles de alternativas que promueven una variedad de individuos que nunca se repiten. Al menos, en la mayoría de las poblaciones. No obstante, el repertorio es finito y el barajado conoce límites. No permiten alargar el pico más allá de una longitud dada o elaborar escamas de un cierto color, o duplicar el número de alas. Esas operaciones exigen la intervención de nuevos genes.

Una clase distinta de diversidad se manifiesta cuando entra en escena un gen extraño, desconocido hasta el momento en el repertorio de la especie. Esto suele ocurrir a cuenta de un error de copia en el ADN, que intercambia letras, las suprime o las añade, o incluso duplica fragmentos enteros del genoma. Sustituir la segunda A de GAA por una T hace que las moléculas-diccionario que asisten a los ribosomas inserten valina en lugar de ácido glutámico en la cadena de aminoácidos, ensamblando una proteína diferente. Entonces, un individuo pasará a albergar una modificación exclusiva en la secuencia de instrucciones que guarda una de sus células. El incidente no acarreará consecuencia alguna para la especie siempre y cuando el organismo no transmita el gen modificado a otros, es decir, no se reproduzca. En los seres pluricelulares la diana ha de ser más específica. La mutación debe afectar a una célula germinal, que son las que participan en la reproducción, ya que el resto se ocupa de otras tareas. Un error de copia en una célula del páncreas no se hereda. La metamorfosis evolutiva parte de organismos concretos y, en el transcurso de miles o millones de años, se propaga en el seno de una población. Los individuos no evolucionan.

Aun en el caso de que el nuevo gen se abra camino hasta la descendencia, puede producir un impacto nulo. El código genético es redundante. El idioma de letras del ADN y el de aminoácidos de las proteínas difieren en el número de palabras. Se pueden escribir 64 palabras de tres letras combinando G, T, A y C y las proteínas se expresan a través de combinaciones de 20 aminoácidos. ¿Cómo casar el 20 con el 64? Después de

emparejar veinte ternas de letras con veinte aminoácidos todavía sobran 44. ¿Qué se hace con ellas? Algunas se asignan a un comando especial: «termina», que indica a los ribosomas cuándo deben poner fin al proceso de traducción, pero aun así siguen quedando palabras de ADN libres, sin aminoácido asociado. El código genético resuelve el problema mediante la polisemia. Hace corresponder a cada aminoácido más de una terna de letras. CCA y CCG, por ejemplo, significan lo mismo: el aminoácido prolina. Luego una mutación que trueque A por G en ese segmento generará la misma frase en la lengua de los aminoácidos.

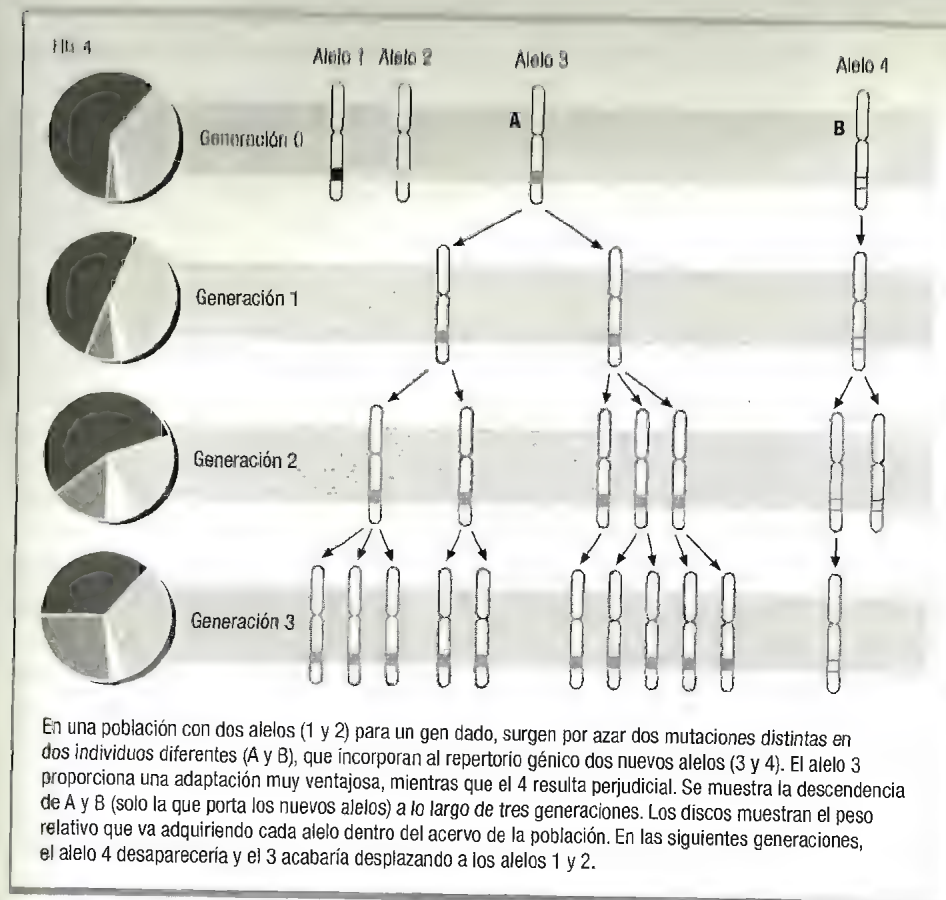
Además, la mayor parte del ADN contiene fragmentos que los ribosomas no traducen y que, por tanto, tampoco influyen en la producción de proteínas. En los seres humanos, las porciones relevantes se reducen a menos de un 2% del genoma. La mutación puede resultar inocua incluso cuando acierta en una secuencia que se traduce. Las proteínas solo presentan una región activa en su estructura. Si se modifica el resto, la célula seguirá desarrollando la misma actividad. Por último, cabe la circunstancia de que se vea afectado un comando genético que define una región crítica de la proteína. En el último capítulo estudiaremos con más detalle cómo inciden esta clase de perturbaciones en el desarrollo embrionario de plantas y animales. Cómo producen una malformación, malogran un órgano vital, causan graves enfermedades o... en un giro menos dramático, modifican un rasgo de un modo que quedaba fuera del alcance del barajado génico que practica la reproducción sexual. Las mutaciones abren la puerta a un mundo de posibilidades, tanto constructivas como destructivas. La selección natural se encarga de cerrar el paso a las segundas y promocionar las primeras. De ahí que dijéramos al comienzo del primer capítulo que actúa como un juez de muchos rostros, que, sin embargo, falla siempre en el mismo sentido. Beneficio y destrucción dependen del contexto, pero, una vez que este queda determinado, la sentencia evolutiva resuelve invariablemente a favor del beneficio. El color oscuro o claro de la mariposa será provechoso o contraproducente dependiendo de si la corteza del abedul en el que

se ha posado está tiznada de hollín o no. La selección natural fomentará siempre la pigmentación que hurte a la mariposa de la mirada de los pájaros.

PODER MUTANTE

Muchas mutaciones dañinas desbaratan proteínas fundamentales durante el desarrollo embrionario y hacen inviable el futuro organismo o lo menoscaban de tal modo que su vida se interrumpe al poco de nacer. Si, a pesar de perjudicar claramente a quienes portan la variante, esta logra transmitirse a la descendencia, se incorporará al repertorio génico de la especie. Allí ocupará una posición efímera y marginal, ya que inaugurará un linaje de individuos peor preparados para hacer frente a los desafíos del entorno. Una mayor vulnerabilidad aumenta las probabilidades de morir antes de procrear. La desventaja no tiene por qué resultar crítica en el corto plazo, pero a la larga pesará como una losa sobre la familia de organismos que cargue con el gen. La descendencia, más numerosa, de los individuos con otros alelos desplazará, en términos relativos, al gen intruso, hasta arrinconarlo en el acervo de la especie (figura 4). El éxito reproductivo multiplica la presencia de un gen dentro de una población, mientras que el fracaso la minimiza. La velocidad del proceso depende en gran medida de la presión del ambiente y de la magnitud del perjuicio. Un gen alterado que disminuya la síntesis de colágeno, propiciando huesos frágiles, no produce el mismo impacto en un grupo de gacelas del Serengeti que en otro que recale en una región aislada y libre de predadores.

Los seres humanos, mediante la selección artificial —donde el veredicto ante la oferta de la variabilidad genética lo dictan personas y no la naturaleza—, han patrocinado mutaciones que no superarían la prueba de la selección natural. Sin la injerencia de los criadores de perros, un linaje de lobos jamás desembocaría evolutivamente en un bulldog o en un chihuahua. Claro que las personas no actúan como jueces evolutivos imparciales, que se atengan a los preceptos de la adaptación y del éxito reproducti-



vo. Obedecen más bien a razones estéticas o al interés por explorar ciertas cualidades de las plantas y los animales, o a un antojo cualquiera, y entonces los caballos, las coles o los tulipanes que pasan a la siguiente ronda generativa son aquellos que mejor se adaptan, no a un ecosistema, sino al capricho humano.

La selección natural actúa como un filtro que tiende a evitar la propagación de novedades. Las excepciones se dan cuando ciertos individuos ven incrementados sus recursos merced a una mutación, lo que habitualmente se traducirá en mejores perspectivas de reproducción. La conquista del genoma procede en fun-

ción de la presión ambiental. Cuanto mayor sea el hostigamiento de los predadores, más de prisa cundirá un cambio en la pigmentación de un insecto que lo confunde contra un fondo de hojas, abundantes en su territorio. A la hora de difundir mutaciones en

los repertorios génicos, no solo participan los agraciados. Al éxito del alelo que ayuda a ocultar al insecto contribuyen tanto quienes lo portan, al sufrir menos el acoso de los pájaros, como quienes carecen de él, al ofrecer un blanco evidente. Dado que los genes residen en células de indi-

viduos concretos, cuando un pájaro escoge sistemáticamente los insectos expuestos e ignora los camuflados, está alterando el genoma de la población. Promociona el nuevo gen en la misma medida que hace retroceder al antiguo.

En términos relativos, la prole de los afortunados será más abundante y la porción que herede la mutación provechosa conservará los privilegios, revalidando así el éxito reproductivo generación tras generación. El número de portadores del alelo crecerá, consolidándolo en el acervo de la especie. En toda esta exposición se han omitido algunas complicaciones que no invalidan la idea de fondo. Como dijimos, en la reproducción sexual se combinan genes del padre y de la madre. En los organismos diploides —aquellos con dos juegos de cromosomas—, la descendencia hereda para cada tipo de gen un ejemplar de cada progenitor. En el sorteo, puede no recibir una versión del gen mutado o su incidencia puede depender de cuál sea el otro alelo que lo acompañe.

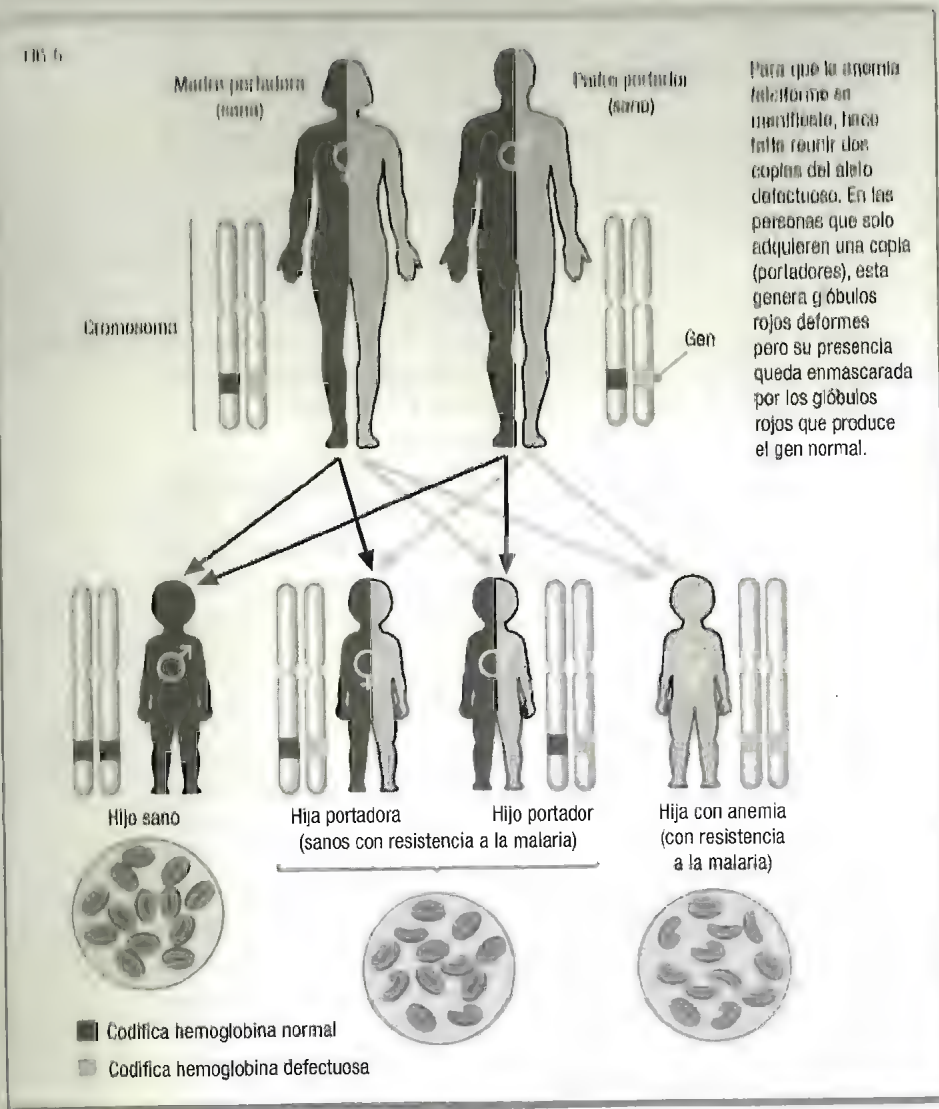
Existen alelos dominantes, cuya mera presencia trae consecuencias; otros, recesivos, solo se hacen notar si aparecen por duplicado. Aun cuando un alelo recesivo resulte útil, su conquista del genoma será lenta, ya que se revelará de manera intermitente: la selección natural solo premiará a la progenie que haga doblete con él. Sucede algo semejante con los alelos recesivos perjudiciales. Quienes adquieran una sola copia no verán menoscabadas sus perspectivas reproductivas. El gen burlará así

la criba de la selección natural, que solo castigará a quienes reúnan una pareja de alelos perniciosos. Las circunstancias pueden incluso jugar a su favor. La anemia falciforme humana obedece a un error de copia en la secuencia de letras del ADN que codifica la hemoglobina: se troca una A por una T. Para padecer esta afección de la sangre, deben concurrir dos alelos mutados, es decir, una misma persona ha de recibirlos por ambas vías, materna y paterna. Si solo obtiene una copia, adquirirá resistencia a la malaria, lo que explica que una mutación en principio nociva aumente su presencia en poblaciones donde la enfermedad infecciosa es endémica (figura 5). Ante la complejidad de los organismos y de la coyuntura que les toca vivir, las ventajas o desventajas rara vez se perfilan con absoluta nitidez.

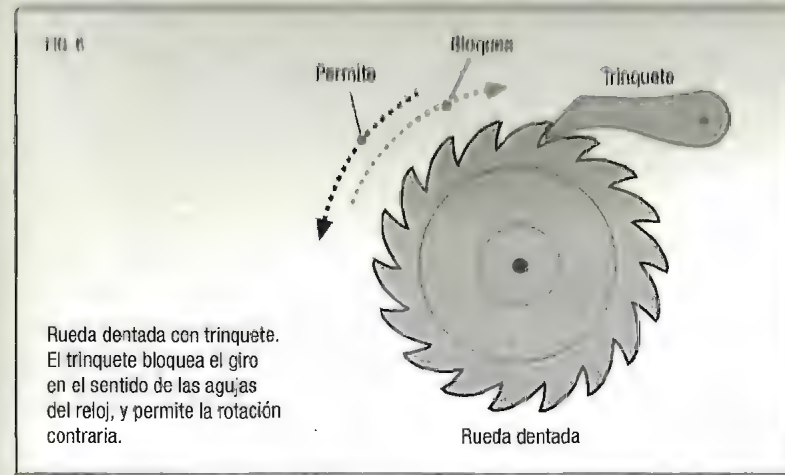
La selección natural opera como una rueda dentada con trinquete (figura 6). Si la novedad genética impulsa la rueda hacia atrás (provoca un daño incuestionable), la selección natural bloquea el retroceso. Si aporta una ventaja, la incorpora y el engranaje adelanta un paso. En esta dinámica se aprecia el carácter no aleatorio de la selección natural. El azar de los errores de copia del ADN pone la rueda en movimiento, pero a largo plazo solo se consolidan los avances. Las mutaciones introducen un constante ruido de fondo en la transmisión de la herencia que, de no rectificarse, iría desvirtuando proteínas e inhabilitando funciones celulares. Pasado un cierto tiempo, se trastocarían las instrucciones para montar un órgano vital o para ejecutar un paso metabólico imprescindible y las poblaciones colapsarían. Sin embargo, el linaje de los individuos afectados languidece y se consume antes de transmitir el error al grueso de la especie. Salvo, claro está, que el error deje de serlo, algo que se aprecia de modo espectacular en los animales que sufren la atrofia de órganos a los que una mudanza del entorno ha robado su función esencial. En la más completa oscuridad la selección natural deja de penalizar y corregir la ceguera. El ruido de fondo ha desbaratado los ojos de una amplia cohorte de animales que viven en cuevas profundas o en lo más hondo de los mares, topos, gusanos, peces y salamandras, favoreciendo el desarrollo de otros sentidos, a los que desplazan sus recursos energéticos.

Quando capté por primera vez
la idea central del *Origen* me dije:
«¡Qué increíble estupidez no haber
pensado en ello antes!».

THOMAS HENRY HUXLEY



Por supuesto, las reformas favorables, por muchas ventajas que procuren, tampoco garantizan la prosperidad ni libran de los golpes del destino. Una mutación dota a un pez de una armadura de espinas más grandes y afiladas, que disuade a sus depredado-



res... y que una red de arrastre no le permite disfrutar. O, quizá, una planta que ha logrado ajustar su floración a un brusco cambio del clima se ve sepultada por un desplazamiento de tierras. Los dinosaurios hicieron gala de un absoluto virtuosismo adaptativo que un meteorito borró de un plumazo. De igual modo, nada impide que un escarabajo con una pata defectuosa transmita su malformación si la suerte juega a su favor y no sufre demasiados sobresaltos antes de poder reproducirse. Solo en el largo plazo el cúmulo de situaciones comprometidas que deben arrostrar los seres vivos suprime las mutaciones que restan recursos o habilidades y fomenta aquellas que los aumentan.

Las mutaciones beneficiosas no suelen acudir como el séptimo de caballería, en el último momento, al rescate de una población en apuros. La selección natural, si se tercia, escoge entre las alternativas que se le presentan, pero no induce su aparición. Y para elegir una opción ventajosa, esta debe hallarse ya, de una manera más o menos marginal, en el genoma. Es muy probable que, hasta entonces, la opción que promociona hubiera pasado desapercibida y no recibiera más presiones a favor o en contra que las del puro azar. El ánsar indio es un ave migratoria que, para dirigirse a Mongolia en primavera, debe salvar el obstáculo de la cordillera del Himalaya. Lo hace rebasando los 6000 metros de altitud, don-

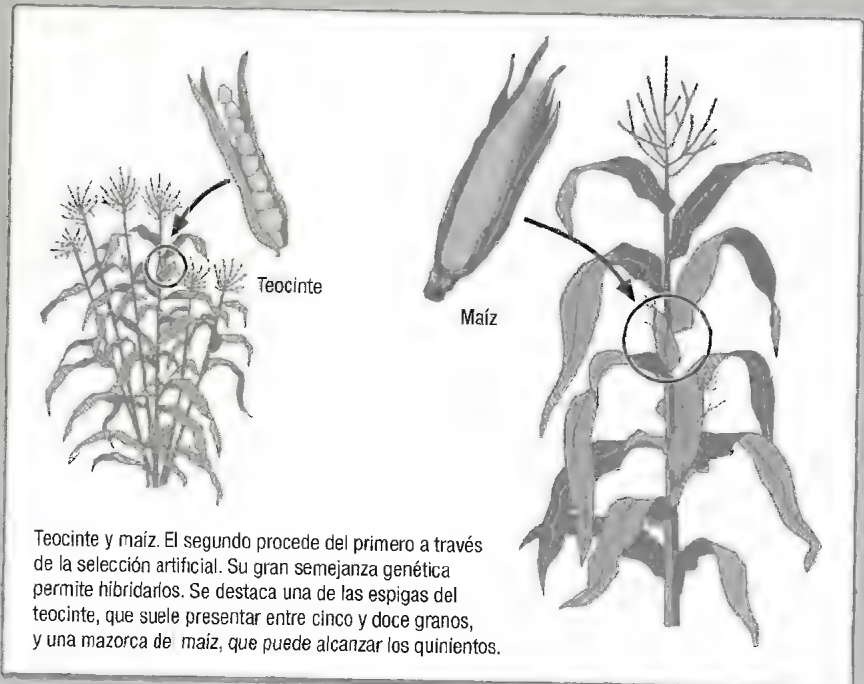
de la presión parcial del oxígeno que a más de la mitad. El ánsar soporta estas condiciones extremas gracias a una mutación en los genes que codifican su hemoglobina, que fabrican una proteína transportadora con una extraordinaria afinidad hacia el oxígeno. Esta virtud pasa inadvertida por completo al nivel del mar, donde la proteína modificada ofrece las mismas prestaciones que la del resto de las aves. Puede que otros repertorios génicos hayan albergado la mutación, sin que destacase en ellos, al no prestarles ninguna utilidad. La diversidad del genoma atesora posibilidades que solo las circunstancias revelan como importantes o intrasendentes. Las soluciones que parecen concebidas *ad hoc* para resolver un reto adaptativo a menudo han permanecido alestargadas hasta que la necesidad las sacó de su sopor. La capacidad de adaptación de una especie se halla directamente relacionada con la cantidad de alternativas que ofrezca su genoma.

Hay que tener en cuenta que muchas alteraciones en los genes tampoco se manifiestan de inmediato y que hablamos de cambios en un solo gen en aras de la claridad. La mutación de un gen puede no darse a conocer hasta que sobrevenga otra mutación en un segundo o tercer gen. Es entonces cuando su efecto combinado se traduce en una modificación observable. Los seres vivos adquieren muchos genes mediante una duplicación fortuita. El original conserva su función y la copia experimenta transformaciones, que dotan al organismo de recursos inesperados. Se trata de un sistema relativamente seguro de ensayar novedades. Así ganó el ánsar indio su hemoglobina de las alturas. Casi un 40% de los genes humanos se deben a este providencial proceso de duplicación y posterior diversificación. Entre ellos figuran muchos receptores olfativos, proteínas que participan en la respiración, como las mioglobinas y hemoglobinas, enzimas digestivas, las proteínas del cristalino o el fotorreceptor responsable de nuestra rica visión en color. La duplicación puede afectar a más de un gen a la vez. Así conquistó los genomas de los animales un grupo de genes reguladores muy particular, del que hablaremos a continuación.

Hay genes que contribuyen a la definición de caracteres secundarios, como la cantidad de pelo o el color del iris, la forma-

RECONOCIMIENTO DE PATERNIDAD

El maíz procede del teocinte, una hierba de Centroamérica y México con la que, a primera vista, no guarda demasiada semejanza. Hasta el punto de que las primeras evidencias genéticas de su parentesco fueron recibidas con escepticismo. Muchos taxonomistas situaban al teocinte más cerca del arroz que del maíz (véase la figura). La ingeniería genética más primitiva, basada en seleccionar genes cruzando los individuos con rasgos queridos, bastó para convertirlo en uno de los pilares de la agricultura en un lapso de unos nueve mil años. El maíz y el teocinte componen una pareja fascinante, ya que en ellos encontramos una especie y su ancestro, que no ha desaparecido. Uno de los primeros en sospechar su afinidad fue el genetista estadounidense George Beadle. Tras un extenso programa experimental de corte mendeliano —cultivando 50 000 plantas—, concluyó que solo cinco genes habían sido responsables directos de la escisión entre las especies. Estudios posteriores apuntan a que su hipótesis, en esencia, es correcta. Un puñado escaso de genes habría orquestado la conversión del teocinte en otra planta. Muchos más mutaron después para pulir la reforma básica. La magnitud del impacto genético afecta a la velocidad de cambio. La diana en pocos genes críticos provoca una transformación más dramática y veloz que la paciente manipulación de cientos de genes menos influyentes.



ción de plumas o escamas, y otros que intervienen en decisiones de mayor entidad. A este último grupo pertenecen los genes reguladores, que codifican proteínas que actúan sobre el ADN, bloqueando la expresión de otros genes o potenciándola. Intervienen en el desarrollo embrionario y deciden dónde y cuándo se originan los ojos o el hígado, o el número y ubicación de las extremidades. A medida que se agravan las atribuciones de un gen, su carácter se vuelve más conservador. Aquellos que definen el plan general del cuerpo o las principales rutas metabólicas son menos susceptibles de admitir variantes y evolucionan con inusitada lentitud incluso con el curso de millones de años. Existen más probabilidades de echar abajo el edificio tocando los cimientos que reformando pisos superiores o remates decorativos. Compartimos con los gusanos genes que determinan el establecimiento del eje boca-ano en el embrión y sus versiones primitivas se pueden rastrear hasta las anémonas de mar. Los genes que resuelven la división del cuerpo en segmentos o que especifican cuántas extremidades se han de desplegar y dónde deben hacerlo se hallan presentes en un mayor número de especies que aquellos que codifican las proteínas venenosas de las serpientes o los fotorreceptores de las aves. El mismo gen que dispara la formación de un ojo con formato de cámara en un ratón o en un calamar, ordena el montaje del ojo compuesto de la mosca. Hasta el punto de que se pueden intercambiar genes entre especies sin comprometer el proceso embrionario. Genes reguladores análogos decretan el desarrollo de patas de saltamontes, patas de rana y pies ambulacrales de erizo de mar, o de corazones de avispa y corazones de orangután.

SENDEROS QUE SE BIFURCAN

Hasta aquí queda claro cómo se gesta la metamorfosis evolutiva en un linaje de seres vivos, a golpe de generaciones, acumulando mejoras y descartando errores en el contexto siempre cambiante de las exigencias ambientales, pero ¿cómo el avance de la rueda con trinquete viene a parar en la fundación de una nueva

especie? ¿A partir de qué punto nos enfrentamos, no ya a una población mejor adaptada, sino a ejemplares de una especie distinta? Puesto que el emblema de una especie radica en el inventario de genes que sus miembros barajan a través de la reproducción sexual, dos especies serán diferentes cuando sus individuos sean incapaces de cerrar un intercambio de genes mediante una descendencia productiva. Esta imposibilidad puede obedecer a las causas más diversas. Una modificación menor, como el cambio en la composición de una feromona o en el canto que llama al apareamiento, basta para que los machos dejen de sentirse atraídos por las hembras, o viceversa. Aunque sean físicamente capaces de reproducirse no lo harán y se interrumpirá el intercambio génico. Hasta una infección bacteriana puede condicionar selectivamente la reproducción de algunos artrópodos.

Cuando no hay modo de que los gametos (las células sexuales con la información genética del padre o de la madre) se fundan en una célula hija viable, se han alzado barreras insalvables. Por mucho que se baraje genéticamente el polen de un olivo con el óvulo de una rosa, o el espermatozoide de un lagarto con el óvulo de una mantis, no traban un genoma coherente que ponga en marcha la magia embrionaria. En el momento en el que se rompe el puente que facilita el intercambio de genes, las mutaciones quedan atrapadas dentro de cada especie. A lo mejor nos vendrían bien los genes que dotan a la retina de las aves de células sensibles al ultravioleta, o la versión del gen que en la mayoría de los mamíferos produce una enzima que sintetiza la vitamina C, pero no podemos intercambiar cromosomas genéticos con un águila o una vaca. Como sucede con frecuencia, estas distinciones tan claras se desdibujan en el mundo de las bacterias y las arqueas, donde las barreras genéticas se franquean con insultante facilidad. La hibridación también difumina un tanto las líneas divisorias entre especies, porque con ella se saltan barreras menores, pero tales excepciones, en muchos casos inducidas por la intervención humana, no empañan el concepto básico.

Las especies no suelen evolucionar en bloque. Rara vez todos sus integrantes se concentran en la misma área. Tienden más bien a dividirse en poblaciones, que se convierten en centros

UN ÁRBOL GIGANTE CON PIES DE HIERRO

Hay genes que se transmiten por igual en el genoma de una bacteria a la de un eucariote, de una bacteria a otra, o del pariente común de la especie y prototipo, desdibujando las relaciones familiares que vinculan a todos los seres vivos. Como vimos, no toda la estructura de una proteína resulta funcional, de modo que la parte que no lo es puede sufrir mutaciones que no afectan a la estructura celular y, por tanto, sin que varíen a consecuencia la selección natural. Estas alteraciones fortuitas dejan marcas características en el ADN, que se transmiten con el de generación en generación, de cada especie ancestral a sus descendientes. Sin acumulación gradualmente las proteínas, con resultados distintos en función de la ruta evolutiva que siguen. El sistema de herencia con modificaciones va dejando así un rastro que permite reconstruir el camino recorrido por los genes. Todos los organismos eucariotas poseen un centenar de ellos en común. Al comparar entre sí las versiones que utiliza cada especie, se deducen los grados de parentesco y se dibujan árboles genealógicos coherentes.

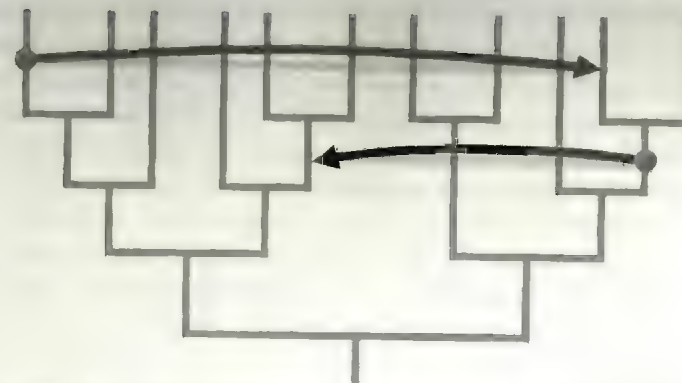
Un árbol enmarañado

Un requisito implícito para que el método funcione es que el legado genético pase de padres a hijos, (transmisión vertical). Las relaciones se complicarían extraordinariamente si un individuo procrea, en un momento dado, insertar en su ADN genes de otra especie. Pensemos en un ser humano, por ejemplo, que adquiriese adaptaciones útiles tras asimilar genes de arañas, ratones o delfines. Una vez integrados en su ADN, los transmitiría a su descendencia. Para estudiar la evolución de este genoma ya no bastaría un esquema genealógico de ramificación sucesiva, que se despliega de abajo arriba (o a la inversa). Habría que reflejar la trayectoria de un elemento foráneo «lateralmente» (figura 1). Este fenómeno, que se antoja extraño en organismos pluricelulares (aunque se da en ellos marginalmente) resulta de lo más habitual entre bacterias y arqueas. No solo heredan genes de su célula madre, también son capaces de incorporar paquetes genéticos completos de individuos con los que no guardan relación familiar alguna o que pertenecen incluso a otras especies. Algunas cepas de *Escherichia coli*, una bacteria común en nuestra flora intestinal, han llegado a adquirir hasta un 20 % de sus genes por esta vía. Los organismos procariotas, además de disfrutar de las mutaciones que atesora su linaje, pueden beneficiarse de los hallazgos de otros, circunstancia que emborrona la base del árbol de la vida (figura 2).

Ramas que no impiden ver el bosque

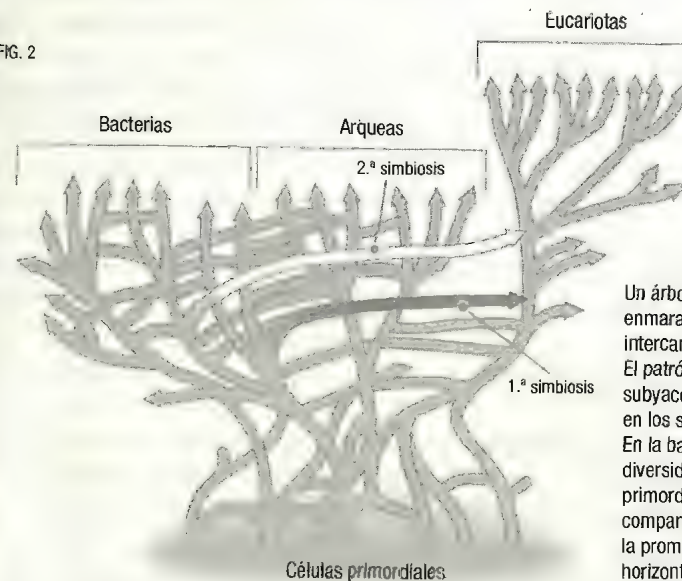
Introducir la transferencia lateral en la ecuación no elimina las relaciones causales. Si se rebobla la película evolutiva, se seguirá observando que todos los seres vivos están emparentados y comparten el mismo origen. Todos entregan a su descendencia el testigo de un ADN heredado (ya sea por medio de mutaciones progresivas o de inserciones horizontales). Y la selección natural continúa juzgando cualquier novedad, al margen de cuál sea su procedencia. Otra cosa es que consigamos reconstruir la historia completa e ilustrar todos sus episodios mediante un árbol genealógico, que además se extienda gradualmente.

FIG. 1



Dos transmisiones génicas laterales entre distintas especies de bacterias. Funcionan como inyecciones de innovación genética (horizontal), al margen del circuito (vertical) de mutaciones graduales.

FIG. 2



Un árbol de la vida enmarañado por los intercambios horizontales. El patrón ramificado subyace, pero solo domina en los seres pluricelulares. En la base se sitúa una diversidad de células primordiales. Aunque comparten el mismo origen, la promiscuidad génica horizontal impide ilustrar su evolución mediante un tronco común bien definido.

independientes de innovación génica. Prosperan por tanto las variedades locales. Esta dispersión supone también que los individuos de una población, por lo común, no tienen acceso al repertorio completo de genes de su especie. Un vistazo a la distribución de razas humanas basta para ilustrar esta circunstancia, que resulta clave para la especiación. Cuando los miembros de una especie se extienden a lo largo de un territorio, a menudo un grupo pierde el contacto con los demás. Los obstáculos que fuerzan el aislamiento dependen de las características de cada organismo, como su tamaño o su movilidad. Para algunos, basta un golpe de viento, para otros se precisa la deriva de los continentes. Hay organismos que encuentran insalvables los vericuetos de un arrecife, la pared de un acantilado, el declive de una montaña, el desvío del curso de un río, la presión que aumenta con la profundidad del agua, el margen de una autopista o el caudal que desborda una inundación. Una vez que la ruptura se hace efectiva, cada grupo experimenta entornos diversos, afronta sus propios predadores, más letales o benignos, disfruta de distintos recursos o sufre castigos desiguales.

En cada comunidad aislada, el genoma, antes compartido, se singulariza. Por un lado, conocerá la entrada de mutaciones que ya no se podrán intercambiar y que se volverán exclusivas de cada población. Por otro, los repertorios recibirán presiones ambientales que tampoco coincidirán. El paso del tiempo irá modelando los genomas conforme a necesidades particulares y materias primas genéticas dispares. El único modo de revertir la divergencia y rebajar las barreras que comienza a levantar la selección natural sería volver a barajar los genes y unificar los acervos antes de que difieran demasiado. Salvo excepciones que ya mencionamos, como la especiación poliploide de las plantas, donde la incompatibilidad se fragua en tres generaciones, habitualmente el proceso requiere una maduración de miles, cuando no millones, de años. La especiación de los peces cíclidos en el lago Nabugabo de Uganda se considera vertiginosa y se estima que tuvo lugar en un plazo de diez mil años. Por eso, para su consolidación, se hace preciso mantener la cuarentena entre poblaciones e impedir el intercambio génico. Llegó un momento

en que, si el destino vuelve a juntar a los descendientes de la comunidad original que se dividió, sus genomas habrán cambiado hasta el extremo de resultar incompatibles. Se habrán convertido en especies independientes. En ese caso, el genoma antes de la separación representa al ancestro común o al punto de bifurcación del árbol evolutivo.

Si la cuarentena no se respeta el tiempo suficiente para apuntalar la especiación, puede tener un efecto revitalizante. Debido a la escisión, las mutaciones enriquecerán por separado los respectivos acervos génicos. Siempre y cuando el azar reúna a dos poblaciones antes de que se hayan levantado las barreras que impiden el intercambio, la reproducción les permitirá sacar provecho de la desconexión y compartir hallazgos. El fenómeno, que recibe el nombre de *flujo génico*, recuerda a las parejas que se alejan una temporada para, al reencontrarse, tener algo interesante que contarse.

La imperfección inherente al proceso de copia del ADN impide la permanencia del carácter de una especie a medida que transcurren los milenios. Actúa como una fuerza repulsiva, como refleja el título del artículo en el que Russel Wallace describía su hallazgo de la selección natural: «Sobre la tendencia de las variedades a alejarse indefinidamente de una forma original». La comprensión de cómo funciona el mecanismo a nivel genético no solo avala la evolución, también demuestra la imposibilidad del fijismo. La selección natural opera sobre el fermento de la variabilidad genética. Sin ella, no existiría discriminación posible. Sin las alternativas que plantea la aparición de nuevos alelos, no habría margen de maniobra para modificar los organismos en respuesta a los cambios del entorno. De hecho, la evolución se define en ocasiones como la variación en la frecuencia de los alelos presentes en el acervo de las poblaciones con el curso del tiempo. Cuando esa versatilidad diferencia repertorios que ya no intercambian genes, se introducen puntos de inflexión a partir de los cuales cada genoma sigue trayectorias independientes.

Señalar que ciertas mutaciones enriquecen el acervo de una especie puede producir la impresión de que todos sus miembros se benefician de ellas. Sin embargo, las ventajas adaptativas se

propagan en un genoma merced a un grupo de afortunados... a costa de los demás. Con frecuencia, el principal obstáculo que encuentra un individuo para satisfacer sus necesidades radica en los demás integrantes de la especie. Son ellos los que buscan la misma clase de nutrientes, que a menudo escasean, y con los que hay que pugnar para conseguir el apareamiento más provechoso. Muchos se quedan en la cuneta del camino que conduce a la incorporación de una ventaja al repertorio colectivo. Mueren de hambre o no se reproducen porque otros mejor dotados les arrebatan el alimento o evitan su apareamiento. Por desgracia, la naturaleza no dispone de recursos ilimitados. Una comunidad cooperativa, igualitaria y preocupada por la suerte de cada uno de sus individuos le tendría que estar enmendando la plana a la selección natural de continuo. Aun así, en el próximo capítulo veremos cómo el altruismo y la cooperación ofrecen también ventajas para ganar en el juego de pasar más genes propios a la siguiente generación.

Los árboles de la vida que consideramos en el capítulo anterior atendían a las diferencias morfológicas, puesto que, antes del advenimiento de la biología molecular, el aspecto de los organismos o su comportamiento suministraban los únicos materiales susceptibles de clasificación. La genética brinda criterios mejor fundados. Compartir versiones de determinadas proteínas revela una afinidad más profunda y consistente que tener alas, patas o aletas. Entre otras razones, porque, en última instancia, son las proteínas las responsables de la estructura y disposición de las extremidades. Cuantas más diferencias se adviertan al comparar los genomas de dos especies, más atrás quedará su último ancestro común en el árbol evolutivo, porque los genomas fueron acumulando las discrepancias con el paso del tiempo. El ser humano comparte un 98% de sus genes con el chimpancé, un 65% con la gallina, un 47% con la mosca de la fruta, un 24% con la vid y un 18% con la levadura.

El escrutinio genético ha confirmado la mayoría de las clasificaciones morfológicas. Los seres vivos coinciden agrupados en un mismo reino porque poseen los mismos genes clave, y se van diferenciando —conforme descienden por la escala de filo,

clase, orden, familia y género— porque discrepan en genes de impacto progresivamente menor. Llegados al nivel de especie, se pueden aislar los genes que causaron la incompatibilidad de genomas muy parecidos. Incluso se han descubierto especies diversas que resultan indistinguibles desde una perspectiva morfológica. Lamentablemente se ha perdido el genoma de la mayoría de los organismos que habitaron la Tierra. El ADN se deteriora con rapidez y, cuanto más nos remontamos en el tiempo, más difícil resulta que un fósil retenga información genética.

Los genomas de los organismos actuales proporcionan algunas de las piezas que faltan. Los genes que han sufrido menos modificaciones y que encontramos en más especies abren una ventana al pasado. Quizá los quinientos que comparten todos los seres vivos sean el último retazo de las células primordiales. No solo poseemos cientos de genes en común con el resto de seres vivos, tanto las semejanzas como las diferencias reflejan los grandes acontecimientos de la historia de diversificación múltiple. Ciertos genes, que se han visto despojados de sus funciones, nos ayudan a reconstruirla.

Para que los rasgos asociados a un gen dejen de manifestarse en un organismo, no hace falta borrarlo del genoma. Basta con silenciarlo. Si se saca de la vía de traducción, si su secuencia nunca llega a un ribosoma y nunca se fabrican sus proteínas, será como si no existiera. Muchos cambios evolutivos proceden de esta clase de ostracismo genético, motivado por el ruido de las mutaciones en genes que han perdido relevancia debido a cambios en el ambiente, de modo que la selección natural no acude al quite para reparar el daño, como ocurría con la ceguera de los animales que se adaptan a una oscuridad completa. Los genes desactivados permanecen en las largas cadenas de ADN, convertidos en blanco de mutaciones aleatorias que ya no se corrigen, hasta quedar desmantelados o suprimidos por un nuevo accidente. Los seres humanos, sin ir más lejos, contamos con la misma familia de genes que confiere a los perros su extraordinario sentido del olfato, pero nuestros antepasados optaron por invertir más recursos en el sentido de la vista. Más de dos terceras partes de nuestras células sensoriales se han especializado en percibir la

luz. A cambio, codificadores de centenares de receptores olfativos acumulan polvo en nuestro genoma, sin que los mecanismos de traducción los convoquen. Los delfines y las ballenas también los atesoran. Ellos no utilizan ninguno. Los genes arrinconados, en principio inútiles para el organismo, resultan providenciales para el estudio de la evolución, ya que permiten establecer parentescos. Al examinar los genomas de los mamíferos, descubrimos que todos poseen variantes de un gen que participa en la síntesis de la vitamina C. Los primates lo tienen desactivado, seguramente debido a que una dieta rica en la vitamina apantalló la mutación fortuita que lo sacó del juego metabólico. El percance lo sufrió un ancestro de los primates y, en una cadena de fichas de dominó genéticas, repercutió en todos sus descendientes. Ahora bien, cada especie ha seguido desmantelando lo que quedaba del gen fantasmal con sus propias mutaciones. Si se comparan los genomas de los primates, las versiones de las especies más próximas se parecen más entre sí, ya que algunas de las modificaciones las comparten porque las heredaron del mismo ancestro. Así, saltan más diferencias entre la variante humana del gen y la de un orangután que entre la humana y la de un chimpancé. Los genes fantasmales, cuyos avatares no enmienda la selección natural, ofrecen un registro de incidentes que, al propagarse por diversos linajes, retratan bifurcaciones evolutivas.

No todos los parecidos y divergencias se manifiestan en los organismos adultos, como la incapacidad para sintetizar la vitamina C. Muchas modificaciones afectan a genes que dirigen el desarrollo del embrión. En el camino que conduce desde la fecundación hasta el nacimiento, constantemente se dejan atrás encrucijadas donde cada especie sigue una senda. Cuando grupos extensos de especies ejecutan la misma serie de pasos, aunque luego diverjan, están revelando la herencia común de un conjunto de instrucciones, aunque esa secuencia no se adivine en las trazas del individuo plenamente desarrollado. Quien busque pruebas del parentesco entre humanos, peces, anfibios y reptiles que recurra a las ecografías. Si se fija en el sistema circulatorio, comprobará que el embrión no despliega desde el principio la organización familiar que se aprecia en las láminas

anatómicas. Comienza esbozando el esquema distintivo de los peces, con una serie de arterias paralelas que alimentaría las agallas, que en nuestro caso no llegan a materializarse. El plan no tarda en alterar su rumbo, desaparecen vasos sanguíneos, otros se estiran y pliegan y aun se forman otros nuevos... apuntando a un diseño típico de los anfibios. Las ranas o los sapos lo adoptan, pero los humanos, como los demás amniotas, dan un giro al esbozo, practican retoques que, de nuevo, reajustan la disposición de vasos, nervios y tejidos, para bosquejar un diseño propio de los reptiles. Un giro posterior aparta al embrión humano de él, para terminar perfilando el sistema circulatorio de los mamíferos. A lo largo del proceso, asoman hasta dos prototipos diferentes de riñón, que recuerdan al modelo que poseen ciertos peces y reptiles. Se configuran y desmantelan, en una fascinante papiroflexia de los tejidos, que solo en la tercera semana conforma el tercer tipo de riñón, esta vez definitivo.

La coreografía embrionaria es una obra colectiva en la que han participado multitud de individuos a lo largo de millones de años, reescribiendo las instrucciones que recibían y entregando las enmiendas a la siguiente generación. Los anfibios definieron su anatomía modificando un ADN que servía para fabricar peces, que heredaron de un ancestro marino. Los reptiles se definieron a partir de un ancestro que portaba esa reescritura, que corrigieron para incorporar modificaciones exclusivas. Tampoco los mamíferos partieron de cero, y establecieron su identidad transformando los mimbres reptilianos. Con todo, nuestras instrucciones conservan páginas que fueron escritas para montar parientes muy lejanos de peces, anfibios y reptiles. Pequeños detalles traicionan su presencia incluso en nuestra vida cotidiana. Algunos científicos defienden que con el hipo se activa un viejo mecanismo que heredamos de los peces con pulmones, que debían manejar un doble sistema de respiración. Podían extraer oxígeno del agua, a través de las branquias, o del aire, haciendo uso de los pulmones. Para evitar que, por error, dirigiesen agua hacia los pulmones, disponían de un reflejo que, de manera regular, tomaba agua y cerraba la glotis, protegiendo la vía pulmonar.

PERO ¿REALMENTE EXISTEN LAS ESPECIES?

La dimensión temporal que la evolución imprime en los sistemas clasificatorios pone en evidencia la relatividad del concepto de especie. La taxonomía se concibió para ordenar los organismos vivos y, si retrocedemos en el tiempo, sus etiquetas corren el peligro de desprenderse. En un cierto sentido, las especies no existen, algo que se aprecia mejor si logramos sustraernos de la ilusión estática del presente. Para zafarnos de ella, recurramos a una sencilla analogía. En 1981 John Landis rodó una secuencia de metamorfosis para *Un hombre lobo americano en Londres*, que marcó un hito en la historia de los efectos especiales. ¿En qué momento su protagonista, interpretado por el actor estadounidense David Naughton, dejaba de ser un hombre y pasaba a ser un lobo? ¿A cuál de las dos categorías pertenecía uno de los estadios intermedios de su transformación, en el que ya asomaba la cola, las manos y los pies se habían convertido en garras, pero la cara conservaba aún rasgos humanos? Si quisiéramos rotular la serie de fotogramas, ¿a partir de cuál de ellos dejaríamos de escribir «hombre» para en su lugar poner «lobo»? ¿Qué aspecto decide la transición de una categoría a otra?

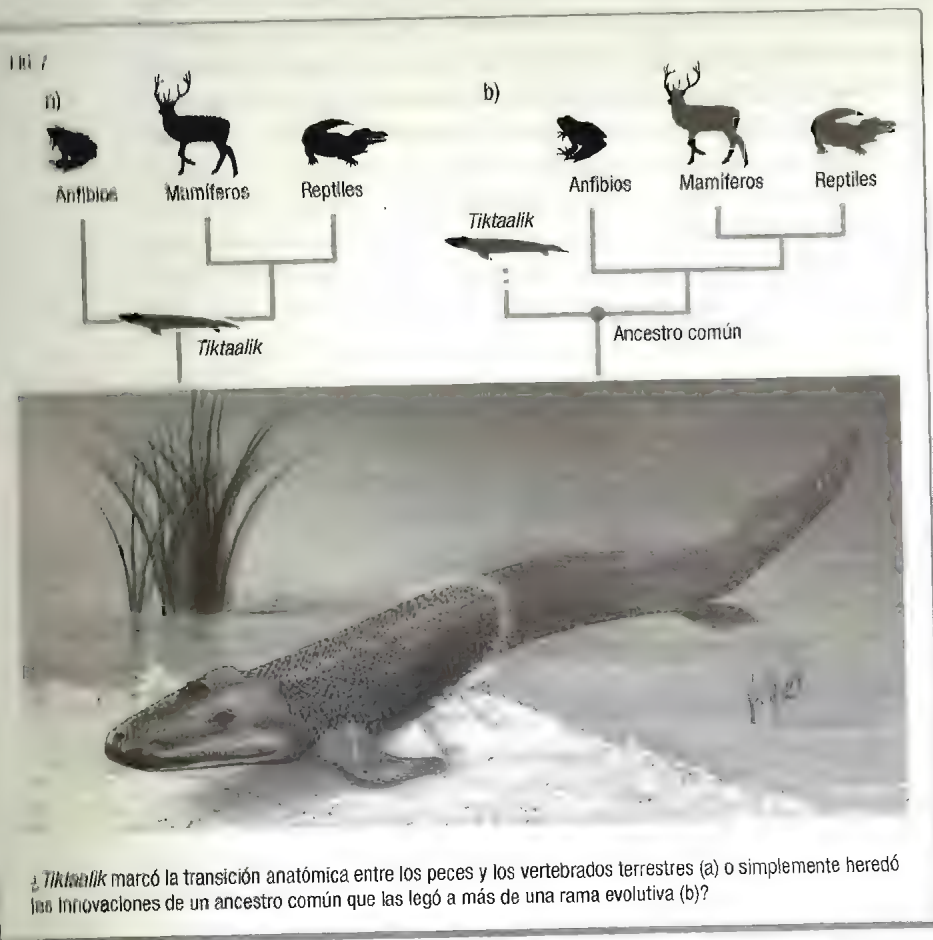
El mismo dilema se plantea cuando se rebobina la película del árbol evolutivo y la atención se centra en una rama cualquiera durante su retirada hasta un punto, donde convergerá con otra que está sufriendo el mismo retroceso. Las especies aparecen claras al principio, porque apreciamos discontinuidades evidentes, saltos de la punta de una rama a otra, que nos permiten etiquetarlas. Pero ¿qué ocurre con las categorías a medida que las ramas menguan o cuando se funden en una sola? Si partimos de una punta, ¿en qué momento hemos de sustituir la etiqueta? Podríamos concluir que justo al llegar a la bifurcación. Ahora bien, cada corte transversal de una rama equivaldría a un fotograma de la secuencia de metamorfosis y representa el estado del genoma de la especie en un instante determinado. Al deslizarnos rama arriba, rama abajo, surgen o desaparecen genes, estos ocupan una situación marginal o cobran protagonismo. Parece absurdo pensar que, mientras la rama se va acortando, la especie

permanece inalterada y cambia justo en el punto de convergencia. ¿Qué ocurre entonces? Simplemente, que el nombre de las especies no alcanza a reflejar la sucesión gradual de cambios que están incubando los genomas.

La nomenclatura de las especies asigna el mismo nombre a las distintas etapas de un proceso complejo, en el que intervienen infinitud de individuos. El fenómeno natural no incurre en ninguna incoherencia. Lo hace la pretensión de que un sistema taxonómico, creado para describir una realidad que se pensaba inmutable, funcione con la misma propiedad para describir todas las fases de una transformación. Tras constatar que dos poblaciones son incapaces de producir una descendencia común, podemos asignar sin ambigüedad un nombre distinto a cada grupo. La naturaleza no es responsable de las situaciones que no están tan claras desde una perspectiva taxonómica. A menudo, la dificultad reproductiva se acentuará progresivamente y el azar dispondrá de un amplísimo margen de tiempo para revertir esa tendencia reuniendo a las poblaciones separadas. Otras veces, la barrera se alzará de prisa, a causa de un accidente, como un error en la duplicación de los cromosomas, por ejemplo. La incompatibilidad tampoco tiene por qué ser uniforme a lo largo de toda una población, aunque llegará un momento en el que se manifestará de modo mayoritario.

El sistema clasificatorio resiste relativamente bien su extensión al pasado, entre otras cosas, porque nuestro conocimiento del mismo es parcial y, por tanto, sigue siendo discontinuo. Los fósiles proporcionan ejemplos de organismos que participaron en el curso evolutivo. Se pueden ver como representantes de la sección de una rama, pero no hay por qué ubicarlos precisamente en las bifurcaciones. Con frecuencia se les atribuye el papel de ancestro común de otras especies, cuando, con toda probabilidad, pertenecían a poblaciones situadas más allá o más acá de la convergencia, o incluso radicaban en otras ramas que no se prolongan hasta el presente. *Tiktaalik*, un animal que nadó en los ríos devónicos, hace unos trescientos setenta millones de años, exhibe rasgos intermedios entre los peces sarcopterigios (con extremidades formadas por huesos) y los tetrápodos (verte-

brados literalmente «con cuatro patas») terrestres. Por un lado, poseía branquias, escamas y dos aletas traseras ancladas sobre un bastidor de espinas. Por otro, había desarrollado un cuello, hombros y dos aletas pectorales con grandes huesos, con un codo y una muñeca rudimentarios, que le permitirían apoyarse y arrastrarse, asomando de las aguas someras, ya que también disponía de pulmones. ¿Eso lo convierte en el cruce de caminos evolutivos de la figura 7? ¿Debemos reconocer en él al ancestro común de anfibios, reptiles y mamíferos? Resulta más verosímil



que *Tiktaalik* fuera un descendiente de dicho ancestro, cuya estirpe se malogró. Esta posición secundaria no resta un ápice de importancia a su descubrimiento, ya que su cuerpo nos enseña las innovaciones anatómicas que adquirió de su predecesor. Muestra también cómo las mejoras adaptativas no señalan una vía única que conduce paso a paso hasta los seres vivos actuales. Fueron compartidas por numerosas especies que se extinguieron.

Las propias bifurcaciones representan de manera simplificada cómo se alteran determinados aspectos con los que caracterizamos poblaciones enteras, a los que subyace un sinfín de factores. El acervo génico de una especie constituye una abstracción. Sería maravilloso que nuestra mente pudiese apreciar de forma intuitiva el despliegue evolutivo en toda su magnitud, advertir su ritmo y su progresión; igual que los esquimales inventan nombres para cada matiz en el blanco de la nieve, crear las palabras que reflejasen cada gradación en las sucesivas mudanzas del conjunto de genes de la suma de individuos vivos, alterando sus anatomías, sus metabolismos, sus desarrollos embrionarios, sus comportamientos.

La ilusión de propósito

La Tierra es plana, el universo entero gira en torno a nuestro planeta, las estrellas son eternas... La ciencia ha disipado infinidad de ilusiones. Quizá ninguna tan persistente como la del diseño intencionado de los seres vivos. Y, sin embargo, la autorreplicación imperfecta, un entorno mudable y el paso del tiempo son los únicos ingenieros del mundo natural.

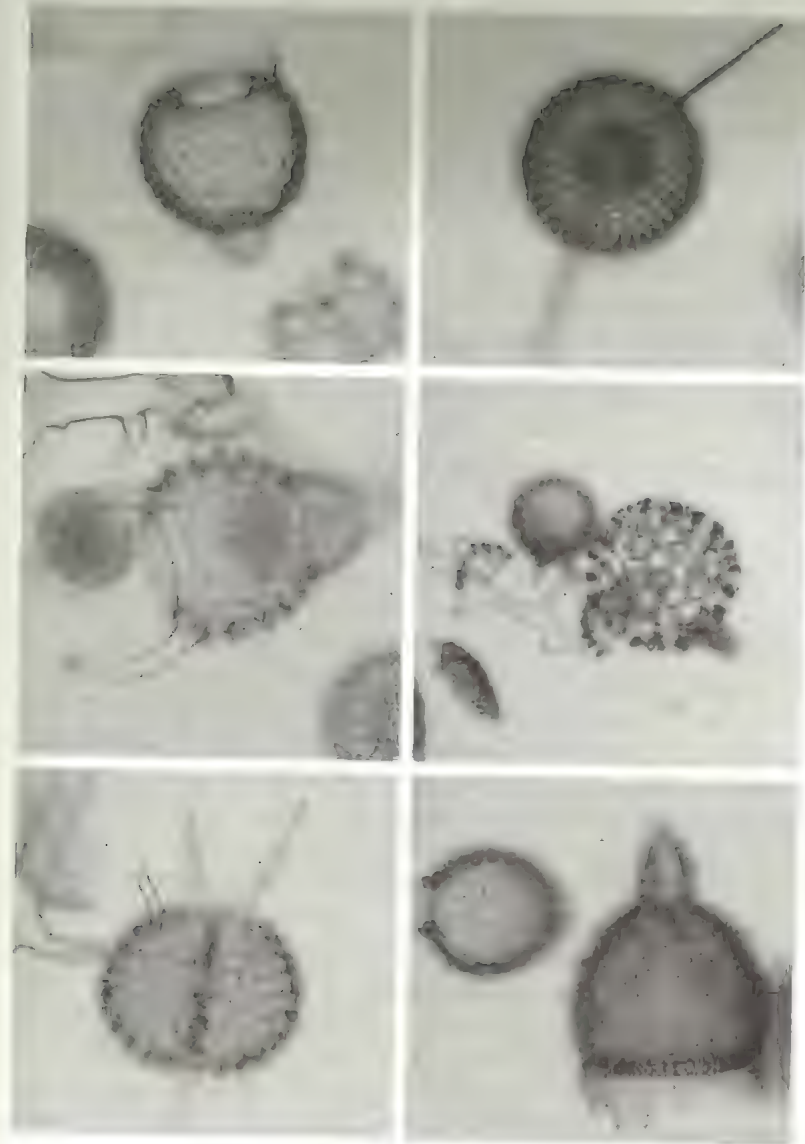
La incapacidad del genoma de mantenerse fiel a sí mismo, acoplada a la discriminación de la selección natural, ceba una máquina para acumular modificaciones ventajosas. Ahora bien, la evolución refleja una sucesión de adaptaciones circunstanciales y no debe confundirse con un programa de perfeccionamiento progresivo. El contexto desde el que la selección natural entiende el beneficio jamás se extiende más allá del presente. A pesar de que despliegue sus operaciones a escala geológica, desconoce el significado de la palabra «previsión». Se limita a discriminar entre las opciones que encuentra en los repertorios génicos, en función de los retos que plantee en cada momento el entorno.

La selección natural es corta de miras y, por tanto, el mecanismo de acumulación de mejoras no se encamina hacia ninguna meta. En este sentido, la divergencia de las especies registra reacciones ante una presión ambiental que se ha mantenido durante el tiempo suficiente. Cuando esta afloja o cambia de dirección, las tendencias evolutivas que apuntaban se frenan, se desvanecen o incluso se invierten. Determinados linajes de aves pueden amagar una atrofia de las alas ante la falta de pre-

dadoreo, que su reaparición revierte. A veces, estas variaciones quedan retratadas en el registro fósil, como en el caso de los radiolarios, unos eucariotas unicelulares que forman parte del plancton marino. Se rodean de un caprichoso esqueleto mineral, cuyas dimensiones menguan o crecen con el paso de millones de años, al compás que dicte la temperatura media del océano o su salinidad. Si estudiamos la estirpe de las jirafas, advertimos cómo al menos una de sus ramas familiares se descolgó de la carrera por alargar las vértebras —que culminaría en la actual *Giraffa camelopardalis*— y derivó hacia herbívoros de cuellos más cortos. En la evolución de los caballos también se advierten avances y retrocesos en el tamaño. El hado caprichoso sopla en una dirección u otra, y por el camino va dejando un reguero de nuevos organismos, al tiempo que barre otros.

La falta de propósito parece entrar en flagrante contradicción con la riqueza de diseños anatómicos y comportamientos que advertimos en la naturaleza. La pulga de la nieve posee proteínas anticongelantes capaces de bajar seis grados el punto de congelación de sus tejidos. El escarabajo bombardero transporta dos reactivos en cámaras separadas de su cuerpo. Cuando se siente amenazado, los combina propiciando una reacción química explosiva, que lanza un chorro de líquido irritante a una temperatura de cien grados. Las inofensivas mariposas virrey adoptan la coloración de las venenosas monarca, espantando a sus potenciales atacantes. Las hembras de ciertas luciérnagas emiten códigos luminosos que corresponden a la llamada al apareamiento que utilizan otras especies, para atraer a sus machos y comérselos. Los seres vivos han coronado cumbres de complejidad mucho más elevadas que las galaxias, los agujeros negros o los planetas, y superan de largo la sofisticación de cualquier invención humana. Cabe admitir que el azar improvise una nube de polvo, una molécula de aminoácido o incluso una estrella, pero ¿una estrella de mar o una luciérnaga que engaña a otros insectos?

La evolución conjuga de forma fascinante dos extremos: lo fortuito y lo tendencioso, lo contingente y lo necesario. El azar plantea una oferta de posibilidades, entre las que la selección



Radiolarios. Deben su nombre a la simetría radial, muy común en ellos, aunque no todos la presentan. Son protozoos que forman parte del plancton marino. Muy sensibles a la concentración de sal en el agua, se pueden encontrar desde cerca de su superficie hasta cientos de metros de profundidad. Tienen un tamaño medio en torno a la décima de milímetro. Los primeros fósiles de radiolarios datan del Cámbrico.

natural encoge con el criterio del beneficio coyuntural. De acuerdo con el viejo adagio evolutivo, la variación o las mutaciones proponen y la selección dispone. O lo que es lo mismo, los condicionamientos del entorno. Así que, aunque no exista finalidad, se manifiesta algo que muy bien se podría confundir con ella: una discriminación que, practicada de manera sistemática y a lo largo de millones de años, arma arquitecturas orgánicas sorprendentes. Ante ellas se experimenta la ilusión de lo deliberado, que se desvanece al constatar soluciones chapuceras, malos acabados o estrategias adaptativas manifiestamente estúpidas a largo plazo.

CÓMO FABRICAR UN OJO (EN SOLO CINCO PASOS)

Dado que los seres humanos somos criaturas eminentemente visuales, el ojo se ha esgrimido a modo de talismán para conjurar el maligno encanto de la evolución desde los inicios de la teoría. Quizá un oso, capaz de detectar un cadáver a treinta kilómetros de distancia gracias a su olfato, escogería la nariz. Ante una pupila que se cierra para atenuar la fuerza del pleno sol y se abre a la penumbra del amanecer o del crepúsculo, un músculo ciliar que modifica la curvatura biconvexa del cristalino con el fin de acomodar el enfoque a diversas distancias, y una retina con millones de células fotosensibles, parece casi perverso llevar la contraria al teólogo natural William Paley, cuando se maravillaba: «¿Qué prueba más evidente puede existir de diseño? [...] ¿Qué más podría haber hecho un fabricante de instrumentos matemáticos para demostrar su conocimiento de cuál es su principio, su aplicación de dicho conocimiento, la adecuación de los medios al fin?». Para un teólogo, la pregunta era retórica y la respuesta, obvia. El mismo Darwin quedó convencido del argumento en sus tiempos de estudiante.

Los ópticos, que han de lidiar con las limitaciones del ojo, muestran menos entusiasmo ante su supuesta perfección. Es famoso el dictamen del físico y fisiólogo Hermann von Helmholtz, que realizó profundos estudios sobre el mecanismo de la visión:

«Si un óptico quisiera venderme un instrumento que tuviera todos estos defectos, me creería con toda la razón para acusarle de negligencia y devolvérselo». Acaso exageraba y el ojo debía asumir compromisos de los que están libres las lentes. Cuenta además con un poderoso aliado que cubre muchas de sus deficiencias: en gran medida, la ilusión de la perfección de la vista la genera el cerebro. No solo urdiendo fantasías creacionistas, sino manipulando los datos que recibe de los sentidos. Borra los agujeros de los puntos ciegos, endereza las imágenes que se proyectan invertidas en la retina, elimina temblores que el movimiento del cuerpo transmite a la cabeza y nos proporciona la sensación de que percibimos todo el campo visual con nitidez, algo que solo ocurre en el centro de la retina, donde se acumulan más fotorreceptores.

Las enmiendas de la mente solo encubren las imperfecciones. Al considerar una célula fotosensible de la que asoma una conexión —encargada de transmitir la información que reciba al cerebro—, parece razonable orientarla de modo que la célula apunte hacia la luz que debe detectar y el cable, hacia el cerebro. En los ojos de los vertebrados se invierte esta disposición: la célula fotosensible encara al cerebro y la conexión, a la pupila. Un arreglo que llena la retina de una maraña de cables, que interfieren en el paso de la luz. Además, al hallarse en la cara equivocada de la retina, las conexiones deben cruzar al otro lado, rumbo al cerebro, cosa que hacen a través de dos boquetes donde se interrumpe la imagen (los puntos ciegos). Los vasos sanguíneos también recorren la superficie externa de la retina, proyectando sombras molestas. Los cefalópodos demuestran que la evolución puede hacerlo mejor. Orientan adecuadamente las células fotosensibles de sus retinas y carecen de puntos ciegos. Se ha argüido que la aparente chapuza del esquema vertebrado podría obedecer a razones de economía energética. La disposición invertida facilitaría el riego de un sistema ocular con más desgaste metabólico que el de los cefalópodos. Sea como fuere, da la impresión de que un ingeniero competente sabría cómo optimizar la eficiencia del diseño sin necesidad de cubrir las retinas de cables o de abrir agujeros en ellas.

Al margen de la opinión que nos merezca el ojo como artefacto, su cadena de montaje evolutiva se halla perfectamente documentada. De hecho, proporciona una maravillosa ilustración de uno de los principios darwinianos: cada etapa del proceso debe

conceder una ventaja respecto a la anterior, aunque sea marginal. De lo contrario, la selección natural no la promocionaría.

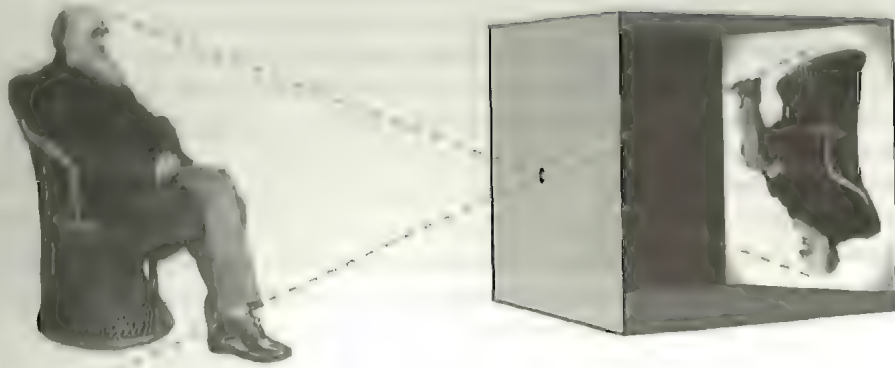
La secuencia se puede abreviar como sigue. Se daría el primer paso con la adquisición de fotorreceptores, lo que supondría una ventaja indudable. A nivel molecular, confeccionarlos tampoco exige innovaciones radicales.

Los pigmentos sensibles a la luz, presentes en los conos y bastones de nuestros ojos, o en las células fotorreceptoras de los artrópodos y los moluscos, son proteínas que derivan de una familia más amplia y antigua de receptores celulares. Se trata de largas moléculas que zigzaguean, entrando y saliendo de la membrana celular, atentas a las señales que lleguen del exterior. Ante la presencia de hormonas o nutrientes, pongamos por caso, desatan una serie de reacciones químicas que provocan la respuesta de la célula. Estos receptores se encuentran en bacterias y eucariotas. Una mutación pudo fácilmente ampliar el catálogo de estímulos a los que respondían, incorporando la luz. Así, los organismos unicelulares fotosintetizadores ganarían la capacidad de localizar la fuente de la que extraen su energía y podrían buscarla y aproximarse a ella. Apreciar la diferencia entre luz y oscuridad también facilita la adaptación al ciclo circadiano del día y la noche. No solo para regular la actividad fotosintética, sino, por ejemplo, para reservar tareas como la duplicación del ADN a los momentos en los que la intensidad de la radiación solar ultravioleta sea menor y, de esta manera, reducir las probabilidades de una mutación. Parte de las células fotosensibles de nuestros ojos siguen desempeñando ese cometido y, en lugar de participar en la visión consciente, dirigen su información al hipotálamo o a la glándula pineal, que controlan procesos bioló-

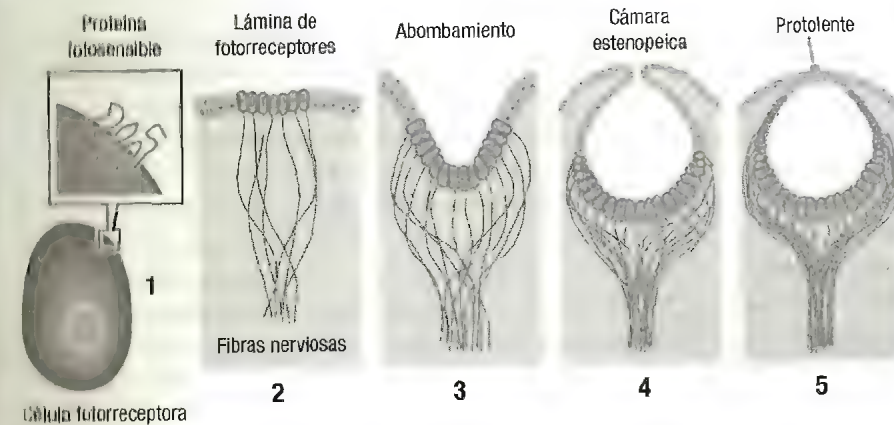
gicos básicos. Existen estudios que muestran que la exposición nocturna a la luz de las tabletas o de otros dispositivos electrónicos puede perturbar los patrones de sueño, haciendo creer al cerebro que es de día.

En el caso de los seres pluricelulares, ampliar la superficie fotosensible mejoraría la información acerca de la situación e intensidad de las fuentes luminosas. Una lámina de células, una retina, representa una ventaja respecto a una sola célula. Las fumarolas del fondo del mar ofrecen uno de los escenarios más plausibles para el origen de la vida. En torno a estas grietas y volcanes submarinos florecen ricos ecosistemas, donde pulula un peculiar camarón, *Rimicaris exoculata*. Carece de ojos en su estadio adulto, pero desarrolla un par de retinas desnudas en el dorso del caparazón, con las que percibe el tenue resplandor que desprenden las fumarolas, de las que emergen a borbotones masas de agua a unos 300 °C, cargadas de metales disueltos. Para el camarón resulta vital distinguir las zonas más calientes, que lo abrasarían, y al mismo tiempo no alejarse demasiado de ellas, porque entonces moriría de frío. La intensidad del fulgor le sirve de termómetro.

Una vez adquirida la lámina fotosensible, o retina, aquellos organismos a los que el azar genético premiase deformándola, creando un abombamiento en su superficie, obtendrían un doble beneficio. Por un lado, afinarían su aptitud para determinar la procedencia de la luz, gracias a la proyección de sombras del borde sobre la cavidad, en una u otra dirección. Por otro, encapsular la zona que rodea la retina limita su exposición y la protege de agresiones del entorno. Las lapas han conservado esta disposición. Acentuar el abombamiento procura más abrigo a la retina incipiente y conduce, por la vía más inesperada, a la formación de las primeras imágenes. Las aberturas mínimas proyectan una imagen invertida sin necesidad de lentes, principio en el que se basan las cámaras estenopeicas o cámaras oscuras (figura 1). El ojo del nautilo, un molusco marino, ve en virtud de este arreglo. Una capa de piel transparente que no entorpezca la recepción de luz brindaría una protección adicional a nuestro ojo rudimentario. Cualquier modificación de las células de esta capa, engro-



Principio de la cámara estenopeica: la luz que penetra por una única abertura, muy pequeña, proyecta una imagen invertida.



Cinco ventajas adaptativas que se convierten en pasos decisivos para montar un ojo con formato de cámara: adquisición de fotorreceptores (1), ampliación de la superficie fotosensible (2), abombamiento de dicha superficie, que permite discernir de qué dirección procede la luz (3), aumento de la protección y formación de las primeras imágenes (4) y germen para la formación de una lente (5).

sándola con una curvatura determinada, ayudaría a enfocar la imagen y arrancaría el proceso de formación de un cristalino. Este también podría surgir adensando la región más externa del humor vítreo.

Esta secuencia conduce desde la aparición de pigmentos sensibles a la luz hasta el establecimiento de ojos con formato de cámara (figura 2). Cada estación de parada provee de una ventaja indudable. Lo hace dando un nuevo giro a material ya disponible, mediante una elaboración sencilla, y sin la guía de finalidad alguna. No todas las secuencias evolutivas resultan igual de transparentes. Ante las lagunas en el registro fósil, uno de los principales desafíos de los biólogos consiste en imaginar qué clase de concatenación pudo dar pie a tal órgano o a aquel comportamiento. Hay que tener en cuenta, además, que ciertos pasos intermedios pueden no redundar en ningún beneficio y no ser más que efectos secundarios de una reforma que mejora otro aspecto del organismo.

EFFECTOS SECUNDARIOS

Los genes no operan desde compartimentos estancos, consagrados a la definición de rasgos particulares. Su actividad recuerda más bien a las organizaciones tensérgicas, en las que una deformación en un punto cualquiera acaba por repercutir en toda la estructura. Algo que aprendieron pronto los criadores de animales. A menudo, los genes desempeñan múltiples funciones y la intensificación de rasgos apetecibles —cerdos con más carne, perros que señalan mejor su presa, caballos de porte más elegante— acarrea efectos indeseados —cerdos más agresivos y propensos a sufrir infartos, perros que sufren trastornos nerviosos o caballos asustadizos—.

El genetista ruso Dimitri Beliaev llevó a cabo uno de los experimentos evolutivos más célebres, centrado en la domesticación del zorro plateado. Trabajó con un grupo que se había segregado un tanto de la vida salvaje, ya que procedía de una granja peletera de Estonia, pero los animales no estaban domesticados.

Generación tras generación, Beliaev buscó los zorros menos agresivos y que se acomodaban mejor a la compañía humana. Usurpó así el papel de la selección natural, poniendo en marcha una criba sistemática que apartaba a los zorros que cumplían

No se puede nombrar un solo animal doméstico que no tenga en algún país las orejas caídas.

CHARLES DARWIN, *EL ORIGEN DE LAS ESPECIES*

con sus requisitos, para, más adelante, cruzarlos entre sí. El experimento se prolongó tras su muerte en 1985. Transcurridas treinta generaciones, se había consolidado una estirpe de zorros domesticados. Una sorpresa aguardaba antes del desenlace: los

animales no solo modificaron su temperamento, también cambiaron de aspecto. Su rabo menguó y dejó de mirar al suelo para apuntar hacia arriba, las orejas adoptaron la tendencia contraria, colgar en lugar de erguirse. El pelaje perdió pigmentación, adquiriendo un patrón moteado. El morro se acortó y ensanchó. Incluso se alteró el periodo de celo de las hembras, pasando de anual a semestral. En pocas palabras, se metamorfosearon en perros. Llama la atención que otros animales domésticos compartan muchos atributos adquiridos por los zorros de Beliaev. Ante presiones selectivas semejantes, experimentan transfiguraciones parecidas. Cambian de tamaño y de pigmentación o abandonan una pauta reproductiva estacional.

Como señalamos en el segundo capítulo, no se debe presuponer una correspondencia unívoca entre genes y rasgos. Un mismo gen puede intervenir en la conformación de diversas características de un ser vivo. Los genes que balancean los efectos de las hormonas y los neurotransmisores pertenecen a este grupo y la cría selectiva, que presiona en el sistema a fin de estimular el desarrollo de cualidades concretas, puede terminar desestabilizándolo. Forzar un crecimiento más rápido, incrementar la masa muscular o la producción de leche puede afectar al carácter de los animales, perturbando su modo de tratar a las crías o de responder al estrés. Los genes no solo regulan, también codifican hormonas y neurotransmisores, sus receptores en las células o las enzimas que promueven su síntesis. En el experimento de Beliaev, se constató un aumento de los niveles de serotonina en

el cerebro de los zorros, un neurotransmisor que se produce a partir del aminoácido triptófano. Contribuye a disminuir la agresividad, pero también participa en la definición de órganos y tejidos durante el desarrollo embrionario.

Dejando a un lado la inferencia humana, la presión ambiental en la naturaleza puede impulsar un cambio que desate en un organismo efectos colaterales adversos que lo inhiban. Estas pulsiones contradictorias, que laten en la complejidad de los seres vivos, explican por qué a veces no se emprenden ciertas reformas biológicas a las que un examen somero encuentra una utilidad evidente y que, además, parecen fáciles de implementar. Tras muchas soluciones obvias se esconden efectos indeseados. La propia selección natural bloquea vías de mejora. Si antes de alcanzar una adaptación óptima hay que pasar por algún estado transitorio perjudicial, el proceso no tendrá lugar. Por supuesto, los mil y un matices que caracterizan cualquier interacción en el medio natural empañan la nitidez de términos como «beneficio» y «daño». La existencia de genes que participan en la definición de más de un rasgo complica la situación. Se hacen sentir no solo en la cría selectiva de animales, sino también cuando su función se deteriora. La tirosina figura en el vocabulario de veinte aminoácidos con los que se construyen las proteínas. También interviene en reacciones químicas que producen hormonas, el pigmento melanina o neurotransmisores como la dopamina. Una mutación en un gen que medie en la síntesis de tirosina desencadenará, por tanto, múltiples efectos. Los síntomas de la fenilcetonuria sirven de triste botón de muestra. Quienes padecen esta enfermedad sufren daños cerebrales, eccema y una pigmentación deficiente. Corromper un gen trastorna el sistema nervioso y, a la vez, causa una tez pálida.

Hay que hurgar con delicadeza en los engranajes de los seres vivos. Las modificaciones suscitan conflictos, que conducen a compromisos que, al fin y a la postre, impiden la perfección. Los seres humanos poseen un gen que se ocupa de bloquear la reproducción de células dañadas, evitando así la proliferación de tumores. Pero al mismo tiempo inhibe la renovación de células que se deterioran con la edad. ¿Cómo maneja la selección natural

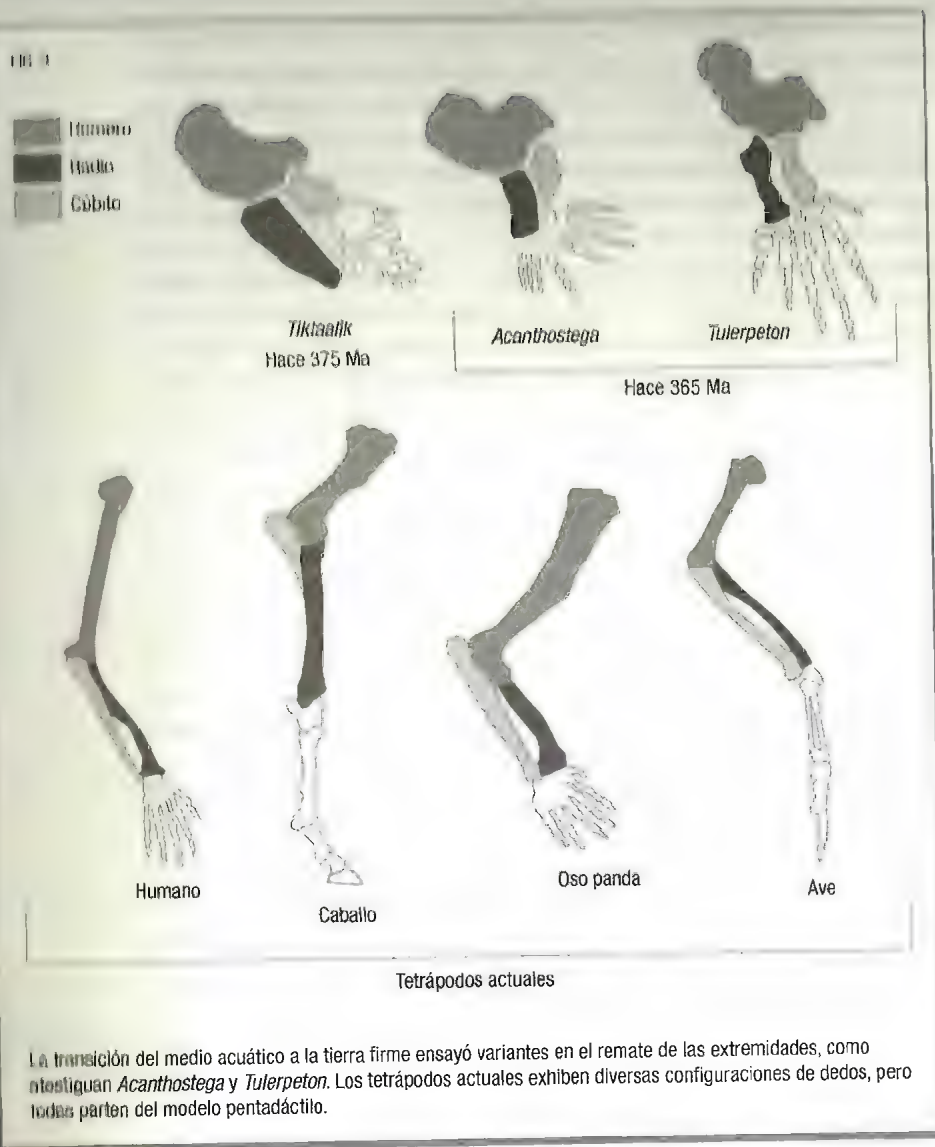
esta espada de doble filo? El período vital en el que se manifiesten daños y ganancias ofrece un criterio decisivo. Los beneficios que se disfrutan antes de y durante el ciclo reproductivo, al igual que los perjuicios que se sufran una vez concluido este, recibirán carta blanca. Los errores de fábrica que afloran en la vejez no se ven sometidos a la labor depurativa de la selección natural. Se ha observado que las moscas de la especie *Drosophila* que ponen más huevos también tienen una menor esperanza de vida. Puede que una actividad reproductiva exagerada baste para ocasionar un mayor desgaste del organismo, pero desde luego si la correlación se debe a un gen, la selección natural lo promocionará y acortará la vida de la mosca a costa de incrementar su eficacia procreadora. Existen teorías que consideran el envejecimiento como una suerte de pacto evolutivo con el diablo. El precio de garantizar el mejor período reproductivo posible se paga genéticamente con la decadencia posterior.

Cuando abordemos la selección sexual, contemplaremos el proceso evolutivo como una guerra de replicación, donde triunfa el organismo que pase más copias de su material genético a la siguiente generación. Cualquier innovación conductual o anatómica que conceda ventajas en esta contienda se verá recompensada automáticamente con su propia proliferación. Dado que las modificaciones se inscriben en el ADN y que el ADN es el testigo que se entrega de padres a hijos, los genes ventajosos se granjean más portadores. Los genes perjudiciales se entienden, dentro de este contexto, como aquellos que interrumpen la replicación o la entorpecen. En un medio que ofrece recursos limitados, dificultar el proceso de copia —que incluye la supervivencia hasta el momento de la reproducción— motiva, tarde o temprano, su cese. Desde esta perspectiva, un gen responsable de una cierta propensión al alzhéimer o cualquier otra enfermedad de manifestación tardía no será un gen pernicioso, ya que no incidirá en el nacimiento de más o menos descendencia.

En ocasiones, aceptar lo evidente puede resultar tan arduo como reparar en lo que se halla oculto. Una tentación que acecha a los biólogos evolutivos a cada vuelta del camino es interpretar todos los fenómenos bajo la luz de la selección natural. El juego

de adivinar las ventajas que reporta a una especie un rasgo determinado está lleno de trampas. Conviene no abusar de la pregunta «¿para qué sirve?» ni pensar que todos los aspectos que se advierten en la forma o el comportamiento de los seres vivos han recibido el visto bueno de la selección natural. Esta no resuelve la disposición completa de los organismos, porque no todos sus detalles resultan funcionales o se deben a condicionamientos del entorno. Abundan los factores que no influyen en las expectativas de supervivencia o de reproducción. A la cuestión de por qué los seres humanos nacemos con cinco dedos, y no con cuatro o seis o siete, cabe responder que simplemente porque descendemos de un ancestro que los tenía. En la mudanza del mar a la tierra surgieron diversos linajes de tetrápodos, con distinto número de dedos. La transformación de las aletas en patas produjo criaturas como *Acanthostega*, con ocho dedos en las manos, o *Tulerpeton*, con seis dedos en manos y pies. La cantidad exacta no parecía ofrecer entonces ninguna ventaja o traba biomecánica claras. Siempre se puede argüir que la posesión de más o menos dedos supuso un factor decisivo para el desembarco exitoso de uno de los linajes, ya que la polidactilia se observa sobre todo en los animales más antiguos, todavía muy ligados al medio marino, pero probablemente fuera una mera cuestión de azar.

Muchos grupos de tetrápodos han tuneado a conveniencia la base de cinco dedos que heredaron. Los caballos exhiben uno solo, las aves poseen tres y las serpientes han perdido por completo las extremidades. En sentido contrario, el panda ha modificado un hueso de la muñeca, el sesamoideo radial, para ampliar a seis su paleta de dedos (figura 3). Con todo, en el embrión del caballo, la gallina, la serpiente o el panda apunta la misma raíz, cuyo desarrollo particularizan, reprimiendo la formación de dedos o extremidades, o jugando con la definición exacta de cada hueso. En los humanos, como en tantos otros tetrápodos, las presiones evolutivas no han forzado grandes desviaciones del patrón original y expresamos tal cual la herencia del ancestro común. Aun aceptando que este hubiese extraído algún beneficio de la variante pentadáctila, ya no sería el caso para la mayoría de sus descendientes. Ciertos rasgos son como son, bien porque, al



aparecer fortuitamente, la selección natural los ignoró y se sumieron al tren del genoma, bien porque revelaron su utilidad para un ancestro y, aun cuando luego esta se perdiera, no se presentó

ninguna razón u oportunidad evolutiva para modificarlos. En el último capítulo, profundizaremos en el papel que interpreta el puro azar cuando hablamos de la deriva génica. Un poco antes estudiaremos cómo los seres vivos se procuran ciertos atributos que no facilitan la supervivencia sino el apareamiento. Por último, como puso de manifiesto el experimento de Beliaev, ciertos rasgos surgen como efectos secundarios de cambios inducidos por la selección en otras parcelas biológicas. Las orejas caídas vienen en el lote de la domesticación y, como no perjudican al zorro, ahí se quedan.

UNA REESCRITURA CONSTANTE

Dado que la selección natural nunca acomete reformas radicales y siempre procede rectificando planes preestablecidos, con frecuencia sus líneas de desarrollo topan con restricciones estructurales que no puede transgredir. Algo que se aprecia en el sistema respiratorio de los insectos. De eficiencia indudable, también limita su tamaño. Las hormigas y abejas gigantes de las películas de serie B morirían de asfixia antes de reducir la civilización humana al caos. Los insectos carecen de un órgano que bombee aire a su interior y su sistema circulatorio transporta nutrientes y desechos, pero no oxígeno ni dióxido de carbono. En esencia, respiran por difusión. El aire penetra sin que ningún obstáculo estorbe su trayectoria, a través de una serie de orificios, los espiráculos, que perforan la superficie del cuerpo. Una vez dentro, se dispersa a través de una red de tubos muy finos que se van ramificando hasta alcanzar los tejidos. Con este sistema, a partir de un centímetro, el aire no se propaga con velocidad suficiente para satisfacer las demandas metabólicas del animal. Las especies de insectos más grandes y activas contraen y expanden el abdomen para inducir el transporte a lo largo del sistema de tubos, pero para suministrar oxígeno a todas las células de un organismo del tamaño de un ratón hace falta replantear el aparato respiratorio de raíz. A no ser, claro, que aumente la concentración de oxígeno en la atmósfera, fenómeno que pudo originar el tamaño

monstruoso de algunos insectos del Carbonífero, como *Meganeura*, un pariente lejano de las libélulas, con la envergadura de una paloma. Quizá algún día los insectos, merced a una oportuna secuencia de mutaciones, emprendan un plan de reformas sucesivas que rompa las barreras que constriñen sus dimensiones. Quizá la presión ambiental nunca los invite a seguir ese camino. A fin de cuentas, tal como son han colonizado, con más de un millón de especies, todos los rincones de la superficie terrestre, salvo el mar abierto. El resto de seres vivos, desde los árboles a las bacterias, tampoco se libran de limitaciones estructurales propias, que explican por qué tras millones de años de ensayar variantes no han superado determinados tamaños.

Otras barreras de la evolución derivan de su mecánica. La selección natural no puede satisfacer las demandas de la supervivencia a menos que el azar le proporcione la materia prima oportuna. Precisa de un fermento para actuar, ya que ella misma no induce la variedad génica. La introducción de nuevos genes obedece a accidentes, que no tienen por qué procurar a los seres vivos lo que necesitan. Si las mariposas del abedul no contasen con un alelo que genera una pigmentación oscura, la contaminación industrial las hubiera dejado a merced de los pájaros insectívoros y seguramente se hubieran extinguido. Numerosas especies han sucumbido porque, frente a una crisis, sus genomas no les facilitaron ninguna solución adaptativa. La presión ambiental tampoco acelera la aparición de mutaciones favorables. La selección natural se limita a escoger entre lo que cada genoma le ofrece en una circunstancia determinada. Se trata de un efecto, no de una causa. Cuestión muy distinta es que las condiciones extremas definan con mayor nitidez qué supone una ventaja o que promocionen determinados genes que, hasta entonces, habían ocupado una posición marginal en el acervo de la especie.

La falta de señales que indiquen hacia dónde debe encaminarse la evolución puede llevar a las poblaciones, cual viajeros perdidos en el desierto, a seguir trayectorias en círculo, como hicieron los linajes de las ballenas y los pingüinos. Si aceleramos la película que registra la metamorfosis de los cetáceos, comen-

SELECCIÓN LTAL

La selección natural puede ser vista como una adaptación a una especie. Los peces llobrillos poseen una especie modificada, que se proyecta por encima de sus ojos a modo de canchales, formada por un colgajo de carne que muchos animales marinos confunden con pequeños camarones o gusanos. Para reforzar la ilusión, el pez agita la carne, imitando la vida al señuelo. Al percibir el menor roce, sus mandíbulas se disparan engullendo a la víctima del engaño. Dado que suelen habitar a profundidades a las que no penetra la luz del sol, algunos cebos albergan bacterias bioluminiscentes. Los colgajos adoptan un catálogo de formas y tamaños dictados por los genes. Aquellos que, por puro azar, se asemejan más a un gusano o una gamba, atraen un mayor número de presas, lo que redundará en una mejor alimentación del pez y unas mejores perspectivas de supervivencia. De ahí que proliferen los descendientes que incorporan el cebo mejorado. Sin saberlo, las víctimas afilan las armas de su verdugo, al premiar los genomas lofiformes que producen cebos más convincentes. Con sus decisiones, los incautos esculpen el señuelo que los condena.



Pez lofiforme de la especie *Antennarius multiocellatus*, con su cebo luminoso en ristre.

zafiaron con un pez que desarrolla cuatro aletas mejor muncu-
ladas y con huesos más grandes, que se alargan, cobran entidad
y articulaciones para facilitar el apoyo en tierra, al tiempo que el
animal pierde las branquias, adquiere un cuello que crece... hasta
que llega un momento en el que la tendencia se invierte, las ex-
tremidades empiezan a menguar (las traseras incluso desapare-
cen), igual que el cuello, y las articulaciones se anquilosan para
servir de nuevo de aletas. Un contexto siempre cambiante azuza
una cadena sin fin de mejoras puntuales que, en última instancia,
no conducen a ninguna parte. Quizá a finales del Devónico la
ausencia de predadores en tierra firme —en oposición a un mar
mucho más poblado y peligroso— favoreciera la exploración de
un vasto territorio que había dejado de ser inhóspito gracias a la
avanzadilla de las plantas, los hongos y los artrópodos. Un viento
propicio que amainaría en cuanto los continentes se llenaran de
depredadores, aumentase la competencia por los recursos y el
mar disfrutara de una relativa calma tras la extinción de los te-
ribles plesiosaurios (otros descendientes de peces que salieron
del agua y regresaron a ella, en este caso siguiendo la vía repti-
liana). Una rama de mamíferos que se había ido acomodando a
la vida acuática, como hacen los hipopótamos hoy en día, apro-
vecharía la coyuntura para mudarse.

La selección natural no previó que iba a sacar a los peces sar-
copterigios del mar para, transcurridos trescientos millones de
años, devolverlos al punto de partida. Retocó las extremidades
para montar patas a partir de aletas y, con ellas, armó aletas de
nuevo. En el ir y venir, los diseños anatómicos perdieron adapta-
ciones óptimas, como las branquias. Aunque las ballenas atravie-
san en su desarrollo embrionario etapas en las que apuntan es-
tructuras que podrían reorientarse hacia la formación de agallas
—como hacen los demás mamíferos, incluidos los humanos—,
el azar de las mutaciones no quiso promover esa recuperación.
La ballena no es el único fruto de vaivenes adaptativos. Las mor-
sas, los ornitorrincos o las focas parecen estar a un paso de re-
tornar al agua y se sospecha que algunas especies de tortugas
esconden en su linaje más de un viaje de ida y vuelta entre el
medio acuático y el terrestre.

Los pingüinos pertenecen a otra casta que trazó un círculo
evolutivo. Sus antepasados dejaron atrás el océano, deambula-
ron por litorales y acantilados y llegaron a dominar el aire, para
después renunciar al vuelo y vivir a medio camino entre la costa
y las profundidades del mar. Para ello, las aletas tuvieron que
transformarse primero en extremidades que corrían. Luego, las
anteriores se tornaron alas... que acabaron convertidas en aletas.
Si los recorridos en círculo evidencian la falta de un objetivo,
otra clase de trayectorias evolutivas parecen denotar al menos
una cualidad, que no es otra que la estupidez. En la espesura de
los bosques, los árboles compiten por el sol y sumen el ámbito
bajo sus copas en la penumbra. Invierten una ingente cantidad
de recursos en transformar el agua y el dióxido de carbono del
aire en madera, para elevar sus hojas por encima de las de sus
rivales y acaparar la luz. A lo que hay que añadir el coste que con-
lleva subir el agua y los nutrientes desde las raíces hasta los pi-
sos más altos de la planta. Gran parte del tronco carece de ramas
y su función no es otra que la de ejercer de zanco monumental.
Si en lugar de obedecer la estrategia de las ventajas marginales
que les ofrece la selección natural, los árboles siguieran los im-
perativos del sentido común, se repartirían el espacio disponible
y extenderían sus ramas a ras de suelo.

La rutina de modificar paso a paso un linaje de organismos a
partir exclusivamente de lo que estos ofrecen y mediante ope-
raciones que deben reportarles siempre un beneficio, deja con
frecuencia cabos sueltos. Remates sin terminar, que no moles-
tan lo suficiente para exigir su eliminación inmediata. Quedan
como vestigios, rasgos accesorios que en última instancia des-
aparecerán o se aprovecharán para otro propósito tras una re-
forma más o menos intensa. Su existencia prueba que, en efec-
to, al estudiar el mundo natural estamos contemplando un solo
fotograma de la película evolutiva, pero fotograma al fin y al
cabo. Igual que una imagen donde una persona parece flotar en
el aire nos transmite movimiento y nos sugiere toda una secu-
encia, en la que el cuerpo primero toma impulso y los pies pierden
contacto con el suelo, en los vestigios sorprendemos órganos o
miembros a medio camino de desaparecer o de convertirse en

otra cosa. En las alas del avestruz, el c6ccix de los humanos o la pelvis de las ballenas y las pitones, advertimos una metamorfosis en marcha. Delatan que el avestruz procede de un antepasado que volaba; el ser humano, de otro con cola; y la ballena o la serpiente, de uno que andaba. Las extremidades y 6rganos consumen energa y, cuando el servicio que prestaban se devala —a causa, pongamos por caso, de un cambio del entorno—, la selecci3n natural puede muy bien aprovechar el ruido de las mutaciones para desmontarlos o darles un uso diferente.

En aquellos lugares donde las aves no sufren el acoso de mamferos y reptiles, y no hace falta elevarse en el aire para buscar alimento porque este abunda a ras de suelo, como sucede en muchas islas, las alas corren el riesgo de atrofiarse. El vuelo gasta demasiados recursos para conservarlo sin un buen motivo. No obstante, su valor como medio de escape se hace patente cuando, de improviso, los seres humanos introducen depredadores en el paraíso, como perros y gatos, y las poblaciones de aves no voladoras se ven inermes, como le sucedió al patr3n y m3rtir de los animales extintos: el p3jaro dodo de la isla Mauricio. La miopse selecci3n natural no dej3 nada apuntado para 6l en el capítulo de imprevistos.

A veces, al constatar que una m3quina debe afrontar nuevas exigencias, la mejor soluci3n consiste en cortar por lo sano y adoptar un enfoque radicalmente distinto. Es un lujo que la evoluci3n no se puede permitir. La obligaci3n de que cada mejora se funde en un planteamiento precedente suele implicar compromisos. Un avance en un aspecto determinado puede ocasionar un ligero retroceso en otro. La evoluci3n de los pingüinos, que consideramos p3rrafos atr3s, ilustra a la perfecci3n este tira y afloja. El vuelo supondría un recurso valioso para estas aves, qu6 duda cabe. Sin ir m3s lejos, les facilitaría la huida del ataque letal de los leopardos marinos. Pero, al mismo tiempo, buscan su principal fuente de alimento bajo la superficie del agua. Son capaces de contener la respiraci3n durante m3s de veinte minutos y se ha llegado a registrar el buceo de un pingüino emperador hasta una profundidad de m3s de quinientos cincuenta metros. Ninguna otra ave puede presumir de una hazaña semejante. Los

REGRESO INESPERADO

En el capítulo anterior dijimos que muchas modificaciones evolutivas dependen de la supresi3n de genes que, aunque anclados en el genoma, por3 se han silenciado. Se comportan como cronómetros dormidos, a la espera del mandato que los movilice. Pueden permanecer atontados, durante millones de ańos, antes de que la falta de uso acabe por desbaratar su funcionalidad. Al no expresarse, la selecci3n natural no corrige la melia que van haciendo en ellos los errores de copia. No obstante, antes de que se desvirtúen del todo, una mutaci3n puede producir el efecto contrario y activarlos excepcionalmente en un individuo, que, de golpe, exhibira un rasgo propio de sus ancestros, que su especie haba perdido. Asa ballenas, delfines y serpientes recuperan extremidades posteriores, algunos caballos restauran dedos o un ser humano nace con una cola rudimentaria o presenta la circulaci3n coronaria de un reptil. En ocasiones, los rasgos ancestrales no se manifiestan en el individuo que nace, pero asoman en alguna etapa del desarrollo embrionario. Entre la cuarta y la quinta semana de gesti3n, del feto humano prota una cola, que se reabsorbe durante la octava semana.



Las boas conservan una cintura p6lvica y dos f6mures vestigiales, que sobresalen a la altura de la cloaca a modo de ganchos o espolones.

pingüinos son excelentes buceadores, gracias a que han desarrollado unas aletas poderosas. Y lo que las vuelve tan adecuadas para nadar las vuelve inapropiadas para volar. El aire y el agua son medios muy distintos y la excelencia en ambos resulta inalcanzable. Las mejores alas no pueden duplicar su éxito como aletas. Los huesos ligeros favorecen el vuelo, por ejemplo, pero flotan y entorpecen el buceo. Quizá las aves que más se aproximan a los pingüinos sean los araós. Son buceadores muy competentes y conservan el vuelo, pero, desde un punto de vista metabólico, volar les cuesta más que a ninguna otra ave. Han pisado el umbral más allá del cual el gasto energético del vuelo deja de compensar y lo cruzarán si insisten en la perfección de su buceo, como hicieron los pingüinos. Salvo que el viento evolutivo los aleje del mar y aligere sus huesos, remontándolos de nuevo a las alturas.

La falta de previsión a la hora de evaluar pros y contras hace que la selección natural incurra en rodeos y complicaciones innecesarias, aunque pergeñe organismos que, en definitiva, funcionan de modo razonable. Muchas peculiaridades fisiológicas delatan la pugna entre la utilidad y los accidentes evolutivos, que son los que proporcionan las piezas necesarias para enmendar un diseño. Si una vía redundante en una clara ventaja y un perjuicio menor en el más corto plazo —siempre nos movemos a una escala temporal evolutiva—, progresará. Este principio, aplicado una y otra vez, sin una visión de conjunto que supervise las reformas, puede desembocar en soluciones anatómicas absurdas. Así se explica la chocante configuración del nervio laríngeo recurrente de la jirafa. Antes de convertirse en el paradigma del mal diseño, la jirafa ya se había coronado como musa de la evolución. En infinidad de libros de texto protagoniza la misma estampa, que ilustra las bondades de la selección darwiniana frente al mecanismo evolutivo propuesto por Jean-Baptiste de Lamarck. Ambos naturalistas señalaron que las hojas más altas de los árboles ofrecen una provisión de comida muy tentadora para la jirafa, en un hábitat, en palabras de Lamarck, «donde el terreno es casi siempre árido y estéril». La jirafa lamarckiana alarga el cuello a base de estirarlo para llegar a las hojas fuera de

su alcance y transmite a sus crías esta característica, adquirida tras una atribulada vida de tormentos cervicales. El cuello de la jirafa darwiniana crece sin traumas, aunque requiere del concurso de más participantes. Dentro del repertorio génico de una población de jirafas, aquellas con un cuello más largo que la media tendrán acceso a un alimento vedado a las demás. Este sustento extra les aporta una clara ventaja para afrontar la dura vida de la sabana. Si la presión a favor de las jirafas más altas coincide con una mutación que permite ampliar la longitud de las vértebras sin efectos genéticos secundarios, estas se alargarán.

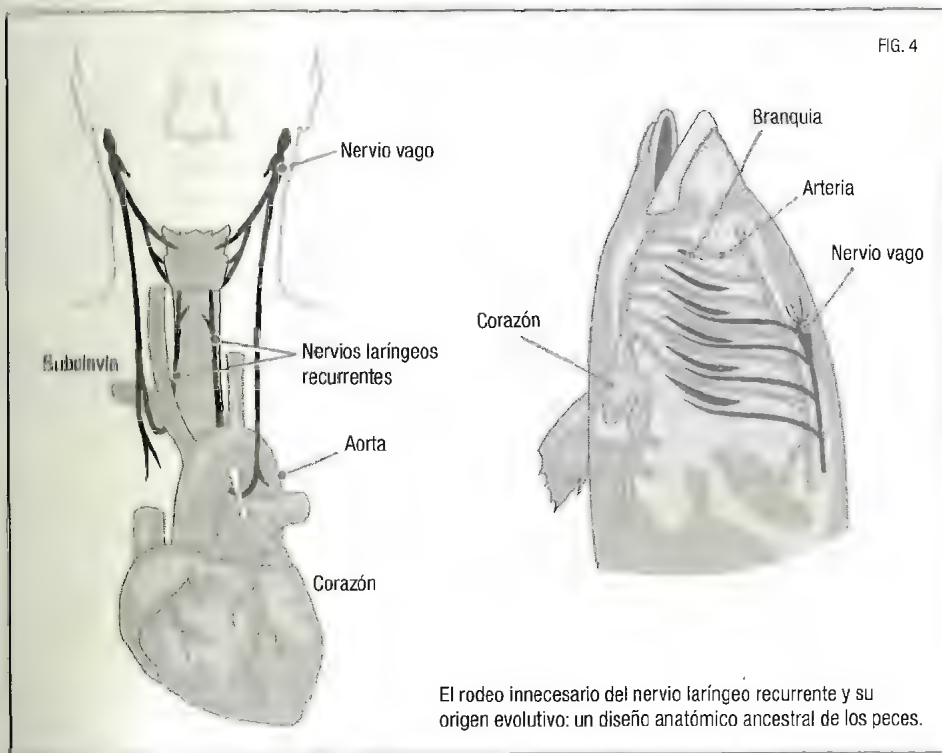
La viñeta no hace justicia a las ideas de Lamarck, que disfrutarían de una inesperada vindicación un siglo después, como veremos en el último capítulo. El icónico cuello de la jirafa acabó sirviendo para ilustrar no solo el modo de obrar de la selección natural, sino también sus fallas. Para verlo es preciso abrirlo en canal, ya que la sorpresa aguarda en el interior. Los nervios laríngeos recurrentes se encuentran en todos los tetrápodos. Debemos a estas ramas del nervio vago, que conectan con los músculos de la laringe, la facultad de hablar. De ahí que los cirujanos que operan la glándula tiroides se conduzcan con sumo cuidado para no seccionarlos. Las malas lenguas atribuyen el declive de la célebre soprano Amelita Galli-Curci a un error médico que, durante una operación de bocio, los habría dañado. Pero también pueden verse afectados en intervenciones del corazón y los pulmones. ¿Por qué, si estos órganos se alojan en el pecho, lejos de la garganta? Las neuronas que conforman el nervio laríngeo parten del bulbo raquídeo y, en lugar de seguir la trayectoria más corta entre la base del tronco encefálico y la laringe, pasan de largo para descender hasta el corazón, deslizarse bajo una arteria —una subclavia en el caso del nervio derecho; la aorta, en el izquierdo— y subir de vuelta hasta la laringe (figura 4). Dado que el interior de la caja torácica no es simétrico, el nervio izquierdo recorre más distancia que el derecho.

La evolución ilumina con claridad meridiana el origen y sentido de esta innecesaria circunvalación. El diseño corporal de los vertebrados adapta un patrón antiquísimo, de peces ancestrales. Los peces carecen de cuello y su corazón se ubica cerca de la ca-

heza. Dentro de su sistema circulatorio, destaca un tramo superior de arterias dispuestas en paralelo que irrigan las branquias. Cada una de ellas viene acompañada de un nervio. El último correspondería al laríngeo. El embrión humano parte de la misma disposición, pero, a lo largo de la gestación, los tejidos, nervios, músculos, arterias y huesos que van surgiendo abandonan el montaje en paralelo. En lugar de branquias, construyen la compleja arquitectura de la laringe, el oído interno o las mandíbulas. Un istmo, el cuello, separa la cabeza del tórax, y el corazón baja hasta instalarse en su localización definitiva. En su descenso, las arterias subclavia y aorta tropiezan con el nervio laríngeo y lo arrastran con ellas (figura 4).

La longitud del cuello de una jirafa puede alcanzar los dos metros y medio, distancia que, con su ir y venir, duplican sus ner-

vios laríngeos. Para justificar el desperdicio que supone una conexión de cinco metros que enlaza dos puntos separados varios centímetros ni siquiera cabe alegar sutiles razones de eficiencia energética, como en el caso de la retina invertida de los vertebrados. La presión por alargar el cuello trastocó el plan anatómico de la jirafa, pero el premio por acceder a la despensa más alta de los árboles pesó más en la balanza que los inconvenientes. Entre ellos, seguir dando de sí los nervios laríngeos, volviéndolos más vulnerables. Por culpa de su desmedida extensión, un golpe en el pecho o incluso una afección cardíaca, o pulmonar, pueden terminar provocando dificultades para respirar, ya que inervan los músculos que abren las cuerdas vocales y su eventual parálisis obstruiría el paso del aire. Quizá el absurdo alcanzó cotas superiores en el pasado. Dado que todos los tetrápodos vivos, desde los anfibios a las aves, pasando por los reptiles y los mamíferos, poseen un nervio laríngeo recurrente, cabe suponer que otros tetrápodos anteriores también lo heredaron del mismo ancestro común. Legado que compartiría *Supersaurus*, un dinosaurio herbívoro que habitó la Tierra hace ciento cincuenta millones de años. Su cuello se extendía a lo largo de doce metros, que su nervio laríngeo tendría que recorrer abajo y arriba. Los impulsos que partiesen del encéfalo de *Supersaurus* llegarían a su laringe tras un rodeo de veinte metros.



Sexo, mentiras y altruismo

Pese a la aparente sencillez de su mecanismo, la selección natural genera una asombrosa complejidad. No se agotan ahí sus paradojas. Concita sin contradecirse engaño y colaboración, competencia y altruismo. Incluso logra que las especies proliferen favoreciendo adaptaciones que parecen conspirar contra la supervivencia de sus individuos.

En caso de que la naturaleza tuviera que defender ante un tribunal su falta de propósito, podría alegar infinidad de accidentes que frustran tendencias evolutivas claras. Y si no, que se lo pregunten al dodo, que en mala hora renunció a su capacidad de volar. La selección natural escoge, pero no decide sobre cómo emergen las opciones que contempla ni se preocupa de que un vuelco en los acontecimientos vuelva contraproducentes sus medidas. Modela con extremada parsimonia, en el curso de miles o millones de años, organismos exquisitamente adaptados a un hábitat... hasta que un revés del destino los borra del mapa. También es cierto que, una vez acusado el golpe, sigue actuando impertérrita sobre cualquier población que sobreviva. Una catástrofe truncó el extraordinario éxito adaptativo de los dinosaurios o de los trilobites. Su desaparición trastocó el equilibrio de los ecosistemas y obligó a reevaluar los recursos genéticos del resto de especies. Sucesos puramente fortuitos introducen ingredientes insólitos en el fermento evolutivo que pueden subvertir por completo las relaciones entre los seres vivos. El mundo estuvo en manos de los procariotas hasta que una simbiosis entre arqueas y bacterias abrió el portal a la dimensión eucariota. Quien

quiera advertir finalidad en la evolución debe ampliar mucho el alcance de las carimbolas, e incorporar a sus cálculos el devenir de la atmósfera, los avatares de los microorganismos o la trayectoria exacta de asteroides y cometas.

La *coevolución* proporciona alguna de las ilusiones más persuasivas de intención. Si levantamos la palabra «entorno», como

si fuera una piedra, y miramos qué esconde debajo, encontramos clima, orografía, volcanes en erupción, ríos desbordados, corrientes marinas, niveles de oxígeno, salinidad, mareas y, ¿por qué no?, también seres vivos. Cuando las alteraciones en el genoma de una especie repercuten en el de otra (o en el de otras), hablamos de coevolución. El término se reserva a grados de dependencia notorios, dado que la vida se sostiene sobre un rico y complejo tejido de interacciones y ningún organismo progresa sin la in-

fluencia de los demás. En determinadas circunstancias, la influencia mutua llega a entrelazar los destinos evolutivos de dos o más especies, que modelan recíprocamente aspectos importantes de su fisiología, su forma o su comportamiento. La relación puede beneficiar o perjudicar a ambas, o solo a una de ellas. Así se reparten los papeles de socio o competidor, parásito y huésped, predador y presa. Cada una de las categorías encierra asombrosos espejismos de propósito, que darían para armar una completísima galería de ilusiones. Algunas de suma belleza, otras simplemente curiosas, incluso cómicas, y también aterradoras. A continuación, esbozaremos apenas un brevísimo catálogo de muestras.

MENTIRAS HERMOSAS

Las relaciones de mutua dependencia entre las plantas con flores y los insectos se remontan a más de cien millones de años.

No se puede decir que los insectos fueran entonces unos recién llegados, pero nada volvió a ser lo mismo para los himenópteros y lepidópteros después del Cretácico, cuando sobrevino la eclosión de las angiospermas. Las plantas no pueden desancalar sus raíces y dejar atrás su enclave familiar en pos de una pareja lejana, que enriquezca su acervo génico. Durante miles de años confiaron la tarea al viento, un mensajero errático y poco selectivo, hasta que el surgimiento de unos diminutos animales voladores amplió de modo inesperado sus perspectivas. Con el concurso de los insectos, las angiospermas conquistaron la tierra firme y desplazaron a los antepasados de las coníferas o los ginkgos, que siguieron confiando sobre todo en los caprichos del aire. A cambio de comida específicamente servida para ellos (el néctar), los insectos se impregnan de polen, que entregan a otras flores en su deambular.

A la planta no le interesa un convidado que visite flores muy diversas, ya que su polen acabará con frecuencia en otras especies. Para aumentar las probabilidades de éxito, le cabe la opción de atraer a muchos insectos, una estrategia despilfarradora, que funciona a costa de malgastar considerables cantidades de polen y néctar. Existe una alternativa mejor: imponer al insecto una cláusula de exclusividad. Igual que cada cerradura admite una sola llave, hay orquídeas que sitúan la glándula que segrega el néctar al fondo de un tubo largo y delgado, al que solo llega una pieza bucal succionadora en forma de trompa, o probóscide, de la longitud apropiada. El insecto también se beneficia de la exclusividad, ya que así no tiene que compartir el néctar con otras especies. En 1862, James Bateman, un horticultor y coleccionista de orquídeas, envió a Darwin un curioso ejemplar procedente de Madagascar, que lo fascinó. La flor de *Angraecum sesquipedale* exhibe un tubo (nectario) de una longitud inusitada. Tras examinar la planta, Darwin dedujo que en la isla africana debía de haber «polillas con probóscides capaces de extenderse hasta los veinticinco o veintiocho centímetros». Russel Wallace afinó la predicción y apostó por una especie concreta: *Xanthopan morgani*. «Los naturalistas que visiten la isla deberían buscarla con la misma confianza con que los astrónomos

buscaron el planeta Neptuno... [y obtendrán el mismo éxito]». En 1907, se descubrió, en efecto, una subespecie de *Xanthopan morgani* cuya probóscide extendida superaba los veinte centímetros (figura 1). ¿Se trataba del animal cuya existencia habían vaticinado Darwin y Wallace? El único modo de confirmarlo era pillar *in fraganti* a la polilla libando. En los años noventa del

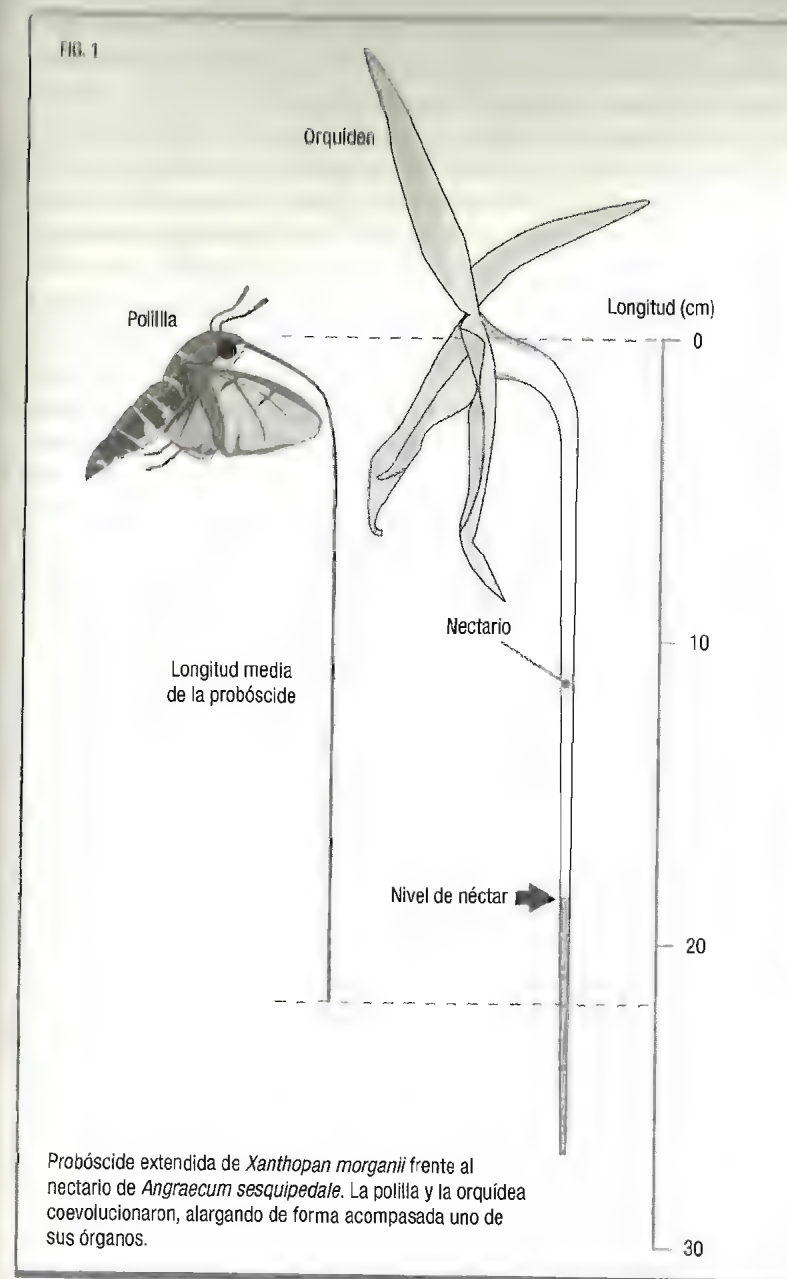
Acabo de recibir una caja del señor Bateman, que incluye una increíble *Angraecum sesquipedale* con un nectario de treinta centímetros de largo. ¡Sabe Dios qué insecto podrá libarla!

CHARLES DARWIN, EN UNA CARTA AL BOTÁNICO
JOSEPH DALTON HOOKER

aplicó Darwin para explicar el desarrollo acompasado de dos adaptaciones anatómicas, cada una en una especie, de un nectario y una probóscide, sembraron la semilla de la noción misma de coevolución.

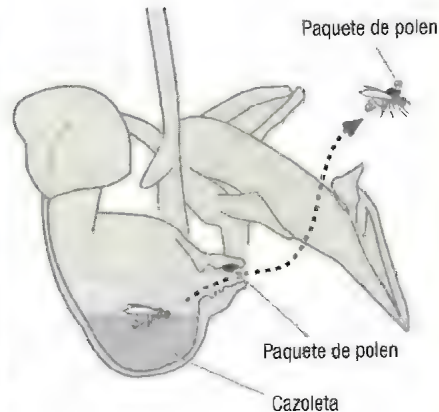
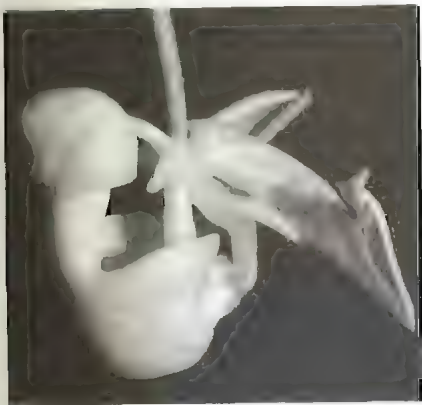
Las plantas no siempre pagan los servicios que les prestan sus alados mensajeros. Las taimadas orquídeas pueden aspirar al trono del engaño dentro del mundo natural, ya que subvierten la relación mutualista por excelencia, entre flores y polinizadores. Se estima que un tercio se dedica con éxito a timar insectos. Muchas copian los colores y aromas de otras especies con néctar sin molestarse en producirlo ellas. La *Ophrys insectifera* llega aún más lejos y remeda el aspecto de una abeja o una avispa situada de espaldas, con la cabeza enterrada en la flor, ilusión que realza desprendiendo un olor que imita al de las feromonas sexuales del insecto. Excitados, los machos tratan de copular con las flores y, en la brega, se impregnan de polen. Para completar el ciclo reproductivo de la planta, deben picar dos veces en el anzuelo. Lo hacen. El género de orquídeas *Coryanthes* ha convertido su anatomía en una trampa para abejas euglosinas. Uno de sus pétalos forma una cazoleta de

siglo pasado, se consiguieron las primeras pruebas fotográficas. Por fin, en 2004, un vídeo sorprendió a la polilla y a la orquídea en la intimidad de su intercambio. El episodio demuestra que la evolución comparte con el resto de teorías científicas la capacidad de hacer predicciones verificables. La polilla se bautizó con el nombre de *Xanthopan morgani praedicta*. Los razonamientos que



paredes resbaladizas, con un fondo encharcado. Los machos englosinos atraen a las hembras mediante un perfume de elaboración química. Su fórmula magistral incluye resinas, madera en descomposición, frutas, excrementos y... secreciones de la orquídea *Coryanthes*. Antes de alcanzar la fuente aromática de la flor, la abeja se ve obligada a pisar terreno escurridizo. Cualquier paso en falso la hará caer dentro de la cazoleta. El líquido que contiene empapa sus alas, impidiéndole volar, así que no le queda más remedio que salir reptando. No obstante, las resbaladizas paredes resultan impracticables. La única salida la ofrece un estrechísimo pasaje. Al forcejear para abrirse camino a su través, las paredes se contraen y oprimen contra su abdomen dos paquetes llenos de polen. Se adhieren mediante un pegamento de acción lenta, que tarda una media hora en cumplir su función. Una vez fijada la carga, se afloja la presión y la orquídea libera a su presa (figura 2). El mal rato que acaba de pasar el pequeño perfumista interrumpe su labor durante

FIG. 2



Las orquídeas tienen tres pétalos. En el caso del género *Coryanthes*, uno de ellos, el labelo, se diferencia claramente de los demás, en forma y tamaño, para configurar la cazoleta que servirá de trampa a las euglosinas. Abeja y orquídea dependen la una de la otra para su reproducción.

un tiempo, lo que evita que caiga de nuevo en la misma planta y la fertilice con su mismo polen. Este irá a parar, muy probablemente, a la siguiente orquídea que logre seducirlo con sus secreciones.

MENTIRAS CRUELES

Las demostraciones de astucia más extremas las procuran sin embargo los parásitos, que convierten la trampa de las orquídeas *Coryanthes* en una broma inocente. Numerosas avispas, hongos, paramecios y gusanos podrían impartir un máster de guerra sucia en cualquier academia militar. Su estudio incomodó a los antiguos naturalistas y teólogos, que buscaban en la naturaleza una expresión directa del temperamento divino. Se las vieron y se las desearon para advertir bondad en la actividad de ciertos insectos. Desde luego sus esfuerzos no convencieron a Darwin, que reconocía su desconcierto en una carta al botánico estadounidense Asa Gray: «Encuentro demasiado sufrimiento en el mundo. No logro persuadirme de que un dios omnipotente y benévolo crease adrede los icneumonidos con la expresa intención de que se alimentaran dentro del cuerpo de orugas vivas [...]». Las avispas de las que hace mención insertan sus huevos en el cuerpo de larvas y arañas, a las que antes paralizan con toxinas. Cuando los huevos eclosionan, las larvas icneumonidas se alimentan de las entrañas de su víctima, que consumen de modo selectivo, evitando el corazón o el sistema nervioso, para mantenerla viva el mayor tiempo posible. Obviamente no lo hacen por crueldad, sino para impedir que la muerte inicie el proceso de descomposición y deteriore los nutrientes. No se trata de un comportamiento aberrante ni excepcional. Se estima que el número de especies de esta familia de himenópteros supera al de las que integran el subfilo entero de los vertebrados.

No todas las larvas icneumonidas se conforman con la explotación pasiva de sus infortunados huéspedes. Las hay que inducen a las arañas que parasitan a modificar el patrón de su tela, para

que tejan para ellas, antes de morir, un bastidor para el capullo donde llevarán a cabo su metamorfosis. Todavía se ignora cómo opera el mecanismo exacto de este control sobre la víctima, que forma parte del abecé de los parásitos. En algunos casos podría deberse a que segregan proteínas similares a las que regulan la síntesis de hormonas o neurotransmisores en sus huéspedes. Interferirían así en su sistema nervioso y podrían, por ejemplo, conducirlos sin resistencia al lugar idóneo para el sacrificio. El gusano nematomorfo *Spinochordodes tellinii* precisa del medio acuático para reproducirse e incita a los saltamontes que infesta a que se arrojen al agua, donde se ahogan.

Los parásitos llegan a aprovecharse de más de una especie en sus ciclos vitales. Los gusanos nematodos *Myrmeconema neotropicum* se alojan en el aparato digestivo de ciertas hormigas de Sudamérica, en el que depositan sus huevos. Causan una infección en la parte posterior del abdomen que altera su color, haciendo que adquiera el aspecto de una baya roja. El equívoco se acentúa porque las hormigas ven dificultados sus movimientos y adoptan una postura de alarma en la que elevan el abdomen. Los pájaros, que no suelen considerarlas un bocado apetecible, caen en el engaño e ingieren así una buena dosis de huevos de *Myrmeconema*. Los expulsan en las heces, que las hormigas sirven como alimento a sus larvas, convirtiéndolas en las inopinadas anfitrionas del gusano.

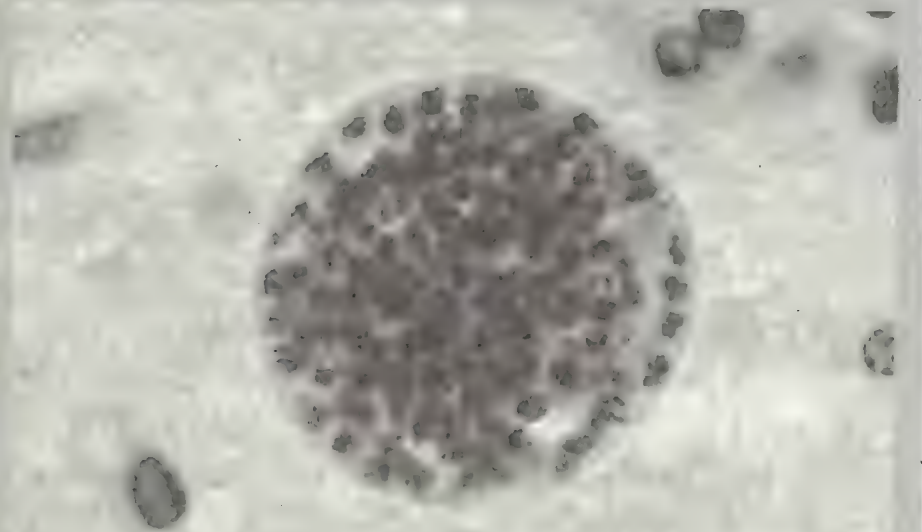
¿Cómo urden los parásitos sus elaboradas estrategias? Obviamente ignoran lo que hacen. Afectan a infinidad de especies, en las que provocan toda suerte de reacciones, y solo en muy raras ocasiones una serie de coincidencias dispara su éxito reproductivo. Lo que hace la selección natural es fijar esos fecundos accidentes en cuanto se presentan, tras billones y billones de ensayos mediocres o infructuosos. De todos los animales a los que invaden los gusanos, solo en un tipo particular de hormigas causan una inflamación que, por casualidad, convierte su anatomía en un señuelo. Si una plaga erradicase la planta que produce las bayas, después de varias generaciones los insectos parasitados podrían dejar de llamar la atención de los pájaros y entonces se desbarataría el ciclo del gusano. Hay que tener

INVASIÓN ENCUBIERTA

La protozoa *Toxoplasma gondii* ha despertado un interés inusitado por su posible (y también discutida) letalidad en los humanos, solo pueden reproducirse en el aparato digestivo de los gatos, y tienen una comida esencial en los ratones antes de alcanzar su objetivo. A primera vista, los roedores no parecen el mejor intermediario, ya que hacen gala de una aversión innata a las feromonas que desprenden los felinos. Nada que *Toxoplasma* no pueda remediar. De algún modo interfiere en la dinámica cerebral de los ratones, eliminando la fobia al olor de los gatos, lo que facilita su captura. Una vez en el estómago del felino, el protozoo se reproduce, propagándose a través de sus excrementos.

¿La humanidad en peligro?

A pesar de su espectacular adaptación a gatos y ratones, el parásito busca cobijo en casi todos los animales de sangre caliente, incluidos los humanos. Se estima que entre un 30 % y un 50 % de la población mundial padece la infección, aunque no se manifieste, lo que da pie a la sugestiva y espeluznante posibilidad de que un microorganismo esté condicionando la conducta de infinidad de personas. Aun en el peor escenario, el sometimiento a los protozoos sería sutil. Se han realizado estudios que apuntan vínculos entre la infección latente en humanos y la predisposición a la esquizofrenia o a los intentos de suicidio. Otros estudios desmienten casi por completo tal correlación. Por el momento, no se han reunido pruebas concluyentes.



Quiste de *Toxoplasma gondii* alojado en el cerebro de un ratón. Contiene miles de parásitos en fase latente.

en cuenta que numerosos aspectos del comportamiento de los animales dependen de neurotransmisores y hormonas que se elaboran con piezas químicas comunes a un sinnúmero de organismos. Los parásitos también forman quistes en los órganos de sus huéspedes —entre otros, en el cerebro—, que trastornan su funcionamiento. A la hora de construir la pared de sus quistes, el protozoo *Toxoplasma gondii* segrega una enzima que en otros organismos interviene en la síntesis de dopamina. Por puro azar, un compuesto químico que realiza una labor estructural podría acabar modificando la conducta de un animal si se libera en su cerebro. A menudo, los parásitos revelan el parentesco a nivel molecular de todos los seres vivos.

Para compensar el panorama inhóspito y lúgubre que pintan los parásitos, haremos una breve parada en el mutualismo, un modelo de coevolución donde dos especies colaboran para hacerse la vida mejor. A él se ajusta la relación simbiótica entre las raíces de los árboles y las hifas de los hongos. Unas y otras se acoplan, de modo que los filamentos de los hongos extienden el alcance de las raíces. Los árboles multiplican así sus puntos de acceso al agua y los minerales del subsuelo. A cambio, los hongos reciben azúcar recién salido de la factoría fotosintética. Hifas y raíces funcionan como cables que conectan entre sí multitud de árboles y hongos de diferentes especies. Establecen verdaderas redes subterráneas de asistencia mutua, por donde circulan recursos de un árbol a otro, e incluso advertencias cuando sufren el ataque de plagas.

La mejor prueba de que la depredación o el parasitismo no destilan la esencia de la evolución radica en que se trata, como quien dice, de recién llegados. El grueso de la historia de la vida en la Tierra ha tenido como protagonistas a organismos que no se comían los unos a los otros ni se dedicaban a infestar a los demás. Durante más de dos mil millones de años, los seres unicelulares convivieron en paz obteniendo su alimento de la fotosíntesis, la quimiosíntesis, la fermentación o la respiración. Después de todo, con la selección natural ya en marcha, existió un mítico jardín del Edén. La única sombra la proyectaba la limitación de los recursos, que frenaba la libre proliferación de arqueas y

bacterias. Estas buenas prácticas tampoco han desaparecido en el superpoblado y mucho más peligroso mundo que sobrevino después.

Engaño, crueldad, colaboración... la coevolución también conoce ejemplos de palmaria estupidez. Igual que los árboles generan ingentes cantidades de madera para quedarse más o menos como estaban, o incluso un poco peor, presas y predadores afilan sus dotes perceptivas, su velocidad o la destreza de sus quiebros para ganar una efímera ventaja sobre el adversario, que no tardará en ponerse al día y recuperar el terreno perdido. Así, la selección natural favorece la adquisición de ventajas marginales en guepardos y gacelas, abocándolos a un derroche de energía que los deja exhaustos y en la misma situación que se hallaban al principio, cuando no eran ni tan rápidos ni tan esquivos, pero ya se habían obcecado en su juego de policías y ladrones. Predadores y presas remedan al niño que corre detrás de su sombra. Como él, persiguen una meta inalcanzable. Han quedado atrapados en una absurda espiral, luchando por adaptarse a un entorno que configura su Némesis, que progresa al mismo tiempo que ellos para neutralizar cualquier avance que hayan conquistado, en una perpetua y frustrante sucesión de metamorfosis.

¿UN MUNDO INCLEMENTE?

En el lenguaje común, el altruismo se entiende como un comportamiento desinteresado que persigue el bien ajeno, aunque acarree un perjuicio a quien lo practica. En el terreno biológico, la eventualidad del perjuicio no se incorpora a la definición para enfatizar la autenticidad del desinterés: constituye un requisito indispensable. La conducta altruista debe suponer una desventaja cierta para su agente al tiempo que favorece a otro. Expresada en estos términos, da la impresión de que la selección natural jamás promocionaría su aparición. Más aún, de que la erradicaría tan pronto como un accidente la cruzara en su camino. Si la generosidad tuviera una componente hereditaria, fundaría un

linaje de seres vivos dispuestos a conceder ventajas a sus competidores. En un mundo donde no todos los individuos pueden acceder a suficientes alimentos o a una pareja, los genes de los egoístas agraçados no tardarían en barrer del genoma a sus incantos benefactores.

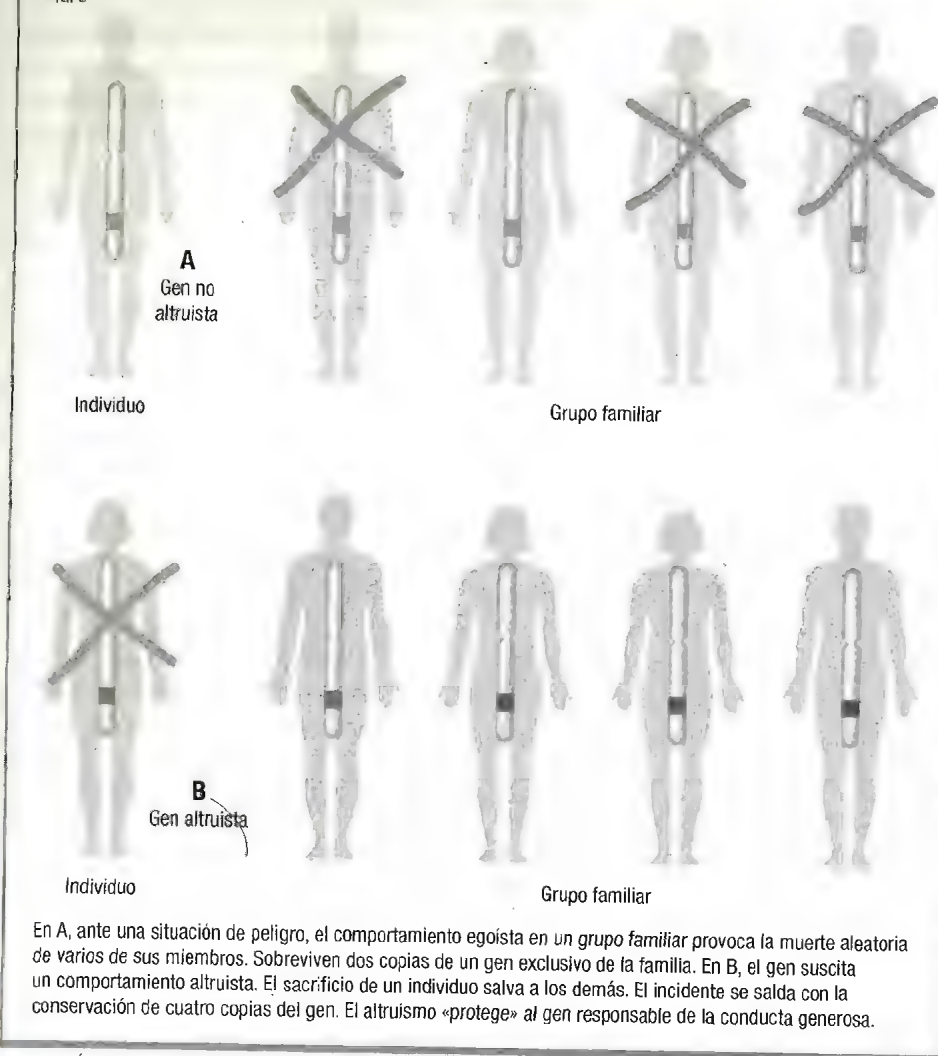
Las estampas populares de la evolución parecen confirmar esta visión derrotista del mundo natural, que caracteriza a la perfección el verso de Alfred Tennyson: «Naturaleza, roja en el colmillo y en la garra». Para muchos, la teoría de la evolución se reduce a un eslogan: «La supervivencia del más fuerte». Sin embargo, la selección natural no desprecia ningún mecanismo que permita a una población producir más individuos con un genoma determinado. Le valen la fuerza, la brutalidad o el engaño, por supuesto, pero, dado que carece de cinismo, tampoco hace ascos a las ventajas circunstanciales del altruismo o la cooperación.

Imaginemos, por un momento, que la presencia de un gen—en aras de la simplicidad; pueden ser varios— en el ADN de un individuo configura un comportamiento altruista hacia los miembros de su familia. Es muy probable que el gen forme parte de la herencia genética común y que, por tanto, la mayoría de los parientes también lo posean. En principio, una conducta que ocasionalmente aumenta la exposición al peligro compromete la supervivencia del gen que la motiva, ya que sufrirá, en promedio, la suerte de sus portadores. No obstante, en la coyuntura que estamos considerando, el mismo gen que se ve perjudicado en un individuo se ve beneficiado en sus familiares. Si al hacer balance se cuentan más favorecidos que damnificados, el gen habrá salido ganando y el altruismo contribuirá a su propagación contrarrestando el impacto de bajas puntuales. Salvar grupos de portadores compensa sacrificios individuales (figura 3).

El altruismo se extiende más allá de las fronteras familiares en grupos sociales donde es correspondido. Los vampiros regurgitan parte de su comida para ofrecérsela a compañeros hambrientos que no han encontrado ninguna. Los cuervos o los suricatos apostan a un vigía que, mientras desempeña sus

funciones, no puede participar en la búsqueda (y disfrute) de alimento. Desventaja que se ve recompensada en cuanto otro ocupa su puesto y es él quien come tranquilamente. Al especular sobre las intenciones de los animales se pisa un terreno

FIG. 3



renbaladizo y no siempre es fácil distinguir entre generosidad y egoísmo. Algunos investigadores estiman que el centinela solo asume su vigilancia cuando se halla satisfecho y que lo hace para ser el primero en avistar a los predadores y ponerse a cubierto. Otros arguyen que un desertor solitario despertaría la atención del predador y que provocar la desbandada encubre a quien da la voz de alarma.

No entraremos en la cuestión de la emergencia de la moral en los animales. Nos conformaremos con apuntar que muchas especies —de aves, primates y otros mamíferos— han desarrollado comportamientos o manifiestan emociones que trascienden el modelo rudimentario de una generosidad condicionada por la reciprocidad. El apego o la empatía estimulan una compleja vida social que hace posible la colaboración, una valiosa fuente de recursos para los individuos.

EL SEXO O LA VIDA

La evolución avanza a caballo de los genes que dominan los acervos de las especies y la espada que conquista los genomas es la reproducción. Sin ella, los genes mueren con los organismos que los albergan. Tal es el empuje de la pulsión reproductiva, que incluso puede permitirse el lujo de navegar en sentido contrario al que conduce a un diseño corporal óptimo, cuando no a la mera supervivencia. De ahí que un tipo particular de selección natural merezca un tratamiento aparte: la selección sexual. Se manifiesta, como indica su nombre, en aquellos organismos que producen su descendencia a partir de una singular colección de genes, que combina la mitad del material génico del padre con la mitad del de la madre.

Una modificación que mejora la adaptación al medio recibe el beneplácito de la selección natural, pero otra que la empeora a costa de aumentar las expectativas de reproducción, también. El medio aquí, como siempre, es un comodín que viene a representar a actores heterogéneos como el clima, los predadores, los competidores o la disponibilidad de nutrientes. En este aparta-

do, encarnará sobre todo a los demás miembros de una misma especie, cuyo comportamiento en torno a la reproducción ejerce una presión notable sobre el genoma compartido. Ya apuntamos que el principal obstáculo que encuentran muchos individuos para satisfacer sus necesidades lo plantean sus propios compañeros de especie. La selección sexual ilustra a la perfección esta lucha intestina, que a menudo se refleja en una clara diferenciación tanto en el aspecto físico (dimorfismo) como en el comportamiento de machos y hembras. Salvo excepciones que mencionaremos brevemente al final, no se suelen invertir los papeles que asignaremos a cada sexo.

La selección sexual promueve rasgos que no procuran una mejor adaptación, sino que facilitan la consecución del apareamiento. Bajo sus auspicios se perfeccionan las armas para vencer en la disputa con otros machos o se adoptan atributos que llaman la atención del sexo opuesto. En el primer capítulo sacamos a colación el caso de los lebistes, peces que despiertan el interés de las hembras con el vibrante colorido de sus escamas. Y también el de sus predadores, teniendo que alcanzar un equilibrio entre potenciar la reproducción o la supervivencia. Conflictos similares se dan con frecuencia, llegando a extremos ciertamente llamativos. El macho del pavo real abre un abanico de plumas tan seductor como indiscreto, que en un principio desconcertó a Darwin. El busto azul eléctrico del ave, enmarcado en un arco de plumas salpicado de ojos iridiscentes, ofrece un blanco magnífico para cualquier felino, perro salvaje o mapache que no quede paralizado por el síndrome de Stendhal. Tan barroco ornamento acarrea además un elevado coste energético, vuelve más vulnerable al pavo real y supone una carga que dificulta su huida en situaciones de peligro. Animales mucho más discretos captan la atención de parásitos y predadores con sus escandalosas llamadas al apareamiento. ¿La selección natural no debería vetar la adquisición de rasgos que incrementan la probabilidad de morir?

La visión de una pluma de la cola de un pavo real, siempre que la contemplo, ¡me pone enfermo!

CHARLES DARWIN, EN UNA CARTA AL BOTÁNICO
ESTADOUNIDENSE ASA GRAY

Darwin llegó a la conclusión de que la eficiencia reproductiva desplaza a la mera subsistencia en el epicentro de la evolución. Desde una perspectiva moderna diríamos que no prima tanto el destino del individuo como el de sus genes. El único modo de que estos sobrevivan a la inevitable decadencia y muerte de los organismos es pasar de una generación a la siguiente cruzando el puente que brinda la reproducción. En general, aumentar las expectativas de supervivencia mejora las expectativas de aparearse, pero ¿qué ocurre cuando ambas entran en conflicto? La respuesta es que deben llegar a un compromiso. Intensificar el atractivo o la visibilidad incide en dos frentes: multiplica la descendencia y las capturas de los depredadores. Mientras compense el beneficio reproductivo, la selección natural pujará a favor de los atributos o comportamientos llamativos. Ahora bien, la obtención de pareja puede terminar acaparando demasiados recursos en detrimento de otras parcelas biológicas que tampoco cabe desatender. Algunas especies parecen tentar en exceso la suerte en su afán de atraer a las hembras. Los casos más espectaculares, como el del pavo real, probablemente rayan en ese límite. Y con seguridad, de vez en cuando, ciertos individuos, un pavo real de cola demasiado pesada o un abigarrado lebiste, cruzan la línea. Entonces, los genes culpables del abuso son eliminados de la población en virtud de la mala fortuna de sus portadores, que mueren antes de reproducirse y propagarlos. A veces, ni siquiera hace falta que crucen la línea: una mudanza del entorno la desplaza. Muchos animales vistosos surgen en ecosistemas donde apenas se hace sentir la presión depredadora y donde abunda la comida. Si se vuelven las tornas, y ante una coyuntura hostil, se extinguen o se ven forzados a moderar su pompa. Los lebistes hacen gala de una gran flexibilidad para atenuar o realzar su colorido en función de las circunstancias.

La evolución puede originar sin duda individuos desinteresados por el apareamiento o que se preocupen más por su integridad que por participar en el a menudo peligroso juego del sexo, pero si el origen de esa desidia es genético, no se consolidará en ningún linaje. El nacimiento de un individuo que exhiba una

adaptación maravillosa o una extraordinaria habilidad para sobrevivir no tendrá la menor repercusión evolutiva si no logra transmitirlas. Un organismo que muere joven y engendra una nutrida descendencia deja más huella en el genoma común que otro que bate un récord de longevidad y apenas se reproduce. La selección natural no avala la creación de organismos más prudentes, sanos o inteligentes, sino la de aquellos a los que se les da bien el juego de sobrevivir hasta que llega la hora de producir nuevos organismos. Su material genético es el que se perpetúa. La habilidad para pasar el testigo a la descendencia ensambló y sostuvo la cadena de seres vivos que se estableció hace casi cuatro mil millones de años. Su historia arma un relato cuyo argumento es el éxito de los reproductores. Bajo el prisma evolutivo, los organismos más aptos son aquellos que logran un óptimo equilibrio entre la eficacia reproductiva y la supervivencia.

Quizá la ilustración más extrema de que la selección natural premia la transmisión de la información genética y no el bienestar de sus portadores lo proporcione el canibalismo sexual, que, por fortuna, parece poco frecuente fuera del filo de los artrópodos. No faltan hipótesis evolutivas para justificar el fenómeno. En algunas especies se ha demostrado que los machos devorados realmente aportan a la hembra mejores nutrientes e incrementan la calidad de su ooteca (la cápsula que alberga los huevos) y, por tanto, de la prole. Desde luego, el macho, después de engullido, no está en condiciones de avisar a sus congéneres de lo que les espera y, si con su muerte asegura una descendencia copiosa y saludable, de entrada, la selección natural no tiene nada que objetar al procedimiento.

El canibalismo sexual ofrece una vía tan buena como cualquier otra para perpetuar un linaje de mantis religiosas o de arañas espalda roja. Otra cuestión es si existen opciones más ventajosas que, de presentarse, la erradicarían. ¿No convendría más a la especie que el macho tuviera oportunidad de copular varias veces, dejando una descendencia más numerosa? Puede que el genoma de estos animales no haya adquirido variabilidad suficiente para plantear alternativas mejores que, paso a paso, des-

manten el canibalismo sin arruinar otros beneficios del modo de vida que han adoptado. Los organismos no operan bajo la máxima del funcionamiento perfecto. Salen adelante con los medios a su disposición, con adaptaciones sucesivas que dependen de la oferta génica y de los condicionamientos ambientales.

El canibalismo suele darse en especies con claro dimorfismo sexual, donde las hembras son más grandes. Si desarrollan voracidad hacia los machos y la selección natural no castiga el hábito, haciendo que las más violentas tengan menos descendencia, el canibalismo se mantendrá. Y disminuir los niveles de agresividad de manera selectiva, respetando a los machos y no a otras presas, puede no resultar tan sencillo. Muchas hembras practican el canibalismo cuando las corteja más de un pretendiente. Ante el exceso de oferta, se comen a los candidatos que consideran menos aptos. También se ha constatado que la situación de la hembra —en particular, el hambre que padezca— influye en su conducta. Una madre desnutrida compromete la salud de su prole, ya que tiene que elaborar la ooteca a partir de secreciones de su organismo. Si está bien alimentada, la especie puede sacar provecho de que el macho sobreviva y copule más veces, pero ante una madre necesitada, se favorece el sacrificio. En el caso de la mantis, se ha comprobado que las caníbales llegan a duplicar su producción de huevos. Así que el macho que es devorado tiene más hijos. Partiendo del supuesto de que tanto su modo de proceder como el de la hembra se hallen condicionados por los genes, su exitosa descendencia tenderá a perpetuarlos. En otras especies de insectos, el macho entrega a la hembra, junto con la cápsula que contiene el esperma, un regalo en forma de comida, el spermatofilax. La alimentación de la hembra es importante para el desarrollo de las larvas. Circunstancia que el canibalismo pone de relieve con contundencia.

Dentro de las estrategias que la selección sexual pone en práctica para propiciar el apareamiento, cabe distinguir dos grandes categorías. En la primera, los machos pelean entre sí para elegir a las hembras (a ella se deben las cornamentas de los ciervos o el voluminoso cuerpo de los elefantes marinos). En la segunda, la hembra escoge a los machos (variante que ocasiona

el despliegue ornamental de los pavos reales). No dejan de ser dos formas de competencia, una directa, basada en la fuerza física, y otra, más sutil, en la que entra en juego la seducción. La bronca rivalidad masculina plantea pocos equívocos y, de hecho, disfrutó de una aceptación inmediata entre los primeros partidarios de la evolución. La cuestión del arbitrio femenino fue otro cantar. Se recibió con un escepticismo casi unánime y motivó uno de los principales desencuentros teóricos entre Darwin y Russel Wallace. Wallace trató de buscar siempre explicaciones alternativas. Consideraba que las pigmentaciones vistosas, por ejemplo, surgían de modo espontáneo a causa de las mutaciones (aunque él no lo expresó en términos genéticos) y que la selección natural convencional se ocupaba de descartarlas en las hembras. ¿Por qué razón? Para dotarlas de un aspecto discreto que no llamara la atención de los predadores durante el cuidado de las crías.

La premisa de que el favor en el cortejo podía condicionar la anatomía de los organismos sin mejorar sus expectativas de supervivencia dejó perplejos a numerosos naturalistas. A fin de cuentas, la agresividad, una mayor envergadura o unos cuernos poderosos sirven tanto para intimidar a otros machos de la especie como para disuadir del ataque a cualquier adversario o predador. ¿Realmente el criterio de las hembras podía acentuar el colorido de los machos, alterar la extensión de sus aletas o la forma de su laringe, imponerles ornamentos derrochadores y ostentosos? Darwin defendió la tesis en *El origen del hombre y la selección en relación al sexo*, un libro que vio la luz doce años después que *El origen de las especies*. Sus páginas aportan un acopio de evidencias, entresacadas casi de cada provincia del reino animal, ya se trate de peces, insectos, moluscos, mamíferos, aves, crustáceos o arácnidos. Quizá el elemento más perturbador de su propuesta radicase, para la mentalidad victoriana, en la potestad que confería al sexo femenino, dado que entre las especies se halla más extendida la elección de las hembras que la competencia entre machos. Para dar una idea de su trascendencia, Darwin llegó a equipararla con la selección artificial humana:

Todos los animales muestran diferencias particulares y, así como un hombre puede modificar los pájaros domesticados seleccionando aquellos individuos que le parezcan más hermosos, la preferencia habitual o incluso esporádica de la hembra hacia los machos más atractivos conduciría casi con certeza a su modificación; y semejante modificación podría, con el curso del tiempo, verse aumentada casi en cualquier grado compatible con la existencia de las especies.

Esta modalidad de selección sexual trasladada al mundo natural el manido titular de las revistas masculinas: ¿qué atrae a las mujeres de los hombres? A la hora de indagar el misterio en otras especies, no cabe el recurso de preguntar a las interesadas. Darwin atribuyó a los animales, en particular a los pájaros, una cierta capacidad de elección y sensibilidad: «En general, las aves resultan los mayores estetas de entre todos los animales, a excepción, por supuesto, del hombre, y manifiestan casi el mismo gusto por la belleza que nosotros». Aptitud que numerosos naturalistas de la época no estaban dispuestos a reconocer. Hoy en día la cuestión no se ha resuelto definitivamente. Por un lado, no todas las especies tienen por qué obedecer a la misma fórmula. Por otro, los motivos de los animales se inferen de experimentos que suelen admitir más de una interpretación. Dos hipótesis destacan sobre las demás. La primera propone que aspectos en apariencia caprichosos, como el colorido del plumaje, un olor intenso, la potencia, duración o complejidad del canto, las muestras de vigor en el cortejo o el tamaño de la cornamenta, en realidad revelan el buen estado de salud de los machos. La desnutrición o la enfermedad impiden al pavo real lucir una cubierta de plumas brillantes y lustrosas. Los peces lebistes son incapaces de sintetizar los pigmentos carotenoides que les otorgan su colorido anaranjado y los extraen de las algas que comen. Cuanto mejor sea su alimentación, mayor será la densidad de pigmentos y, por ende, la viveza de sus escamas. La presencia de parásitos afecta a la tonalidad en varias especies. Las hembras aprecian también la vitalidad con la que nadan los lebistes en las fases previas al apareamiento.

En aquellas especies en las que el macho participa además en el cuidado de la prole (no es el caso del pavo real ni, desde luego, del lebiste, que puede llegar a comérsela), su mal estado físico cargaría a la madre con las tareas que este no pudiera desempeñar. Por no hablar de los perjuicios que le ocasionaría el contagio de una enfermedad o la transmisión de parásitos. No cabe duda de que desarrollar la habilidad para detectar machos sanos y resueltos, capaces de aportar recursos en un mundo ferozmente competitivo, redundaría en una mejor calidad de vida para la hembra y su descendencia.

Una segunda hipótesis somete la decisión al imperio del gusto. Si dentro de una población un rasgo determinado resulta más atractivo, su afortunado poseedor recibirá más solicitudes de apareamiento y disfrutará de una descendencia numerosa. En ella encontraremos tanto machos como hembras. En el caso de que la predisposición hacia el rasgo se cifre en los genes, el éxito reproductivo lo difundirá entre las hembras, mientras que el rasgo en sí lo hará entre los machos. Así, tanto el deseo como su objeto se propagarán por el genoma de la población. ¿Por qué un atributo determinado cae en gracia en detrimento de otros? Aquí tampoco escasean las hipótesis: el mero azar en la conformación de la sección del genoma que dicta las preferencias, el eco de otra clase de predilecciones —como un color asociado a una fruta apetecible— o el poder de la novedad para estimular el interés. Recurriendo de nuevo a los lebistes, se ha observado la inclinación de las hembras hacia los colores menos abundantes dentro de cada población, sin que por ello dejen de valorar la viveza del tono o la energía que despliega el macho durante el cortejo.

¿Qué guía, pues, a las hembras y modela a los machos? ¿El incentivo de la novedad, un sentido estético primario, la búsqueda de buenos genes o de mejores recursos materiales? La multiplicidad de las hipótesis no las vuelve excluyentes. Quizá expongan factores que se dan en diversos grados en función de cada especie. Cualquiera que sea el resorte que motiva la elección, parece razonable que la decisión recaiga en las hembras, teniendo en cuenta que la reproducción suele pasarles una factura más onerosa. Los espermatozoides se limitan a completar la información

genética que le falta al óvulo. A partir de ahí, el proceso promigue a expensas de la madre, bien porque el embrión se desarrolle en su interior, bien porque lo haga dentro de un huevo, con protección y nutrientes que ha suministrado el organismo materno. El futuro de las poblaciones depende del resultado de esta inversión, así que tiene sentido que quien cargue con la responsabilidad también decida. De hecho, los raros ejemplos en los que se intercambian los roles tradicionales entre sexos se deben a que una mayor implicación por parte del padre compensa y supera el gasto inicial de la madre.

La selección sexual de Darwin ofrece una explicación convincente de por qué los caracteres sexuales secundarios (es decir, aquellos que no se derivan directamente de las peculiaridades de cada aparato reproductor), como el colorido de un animal, su tamaño, la voz o el plumaje, vuelven tan distintos a los machos y las hembras de ciertas especies. De los estudios comparativos emerge una clara correlación entre el grado de disparidad y la implicación del macho en el cuidado de la prole. Ante una población de hembras discretas y machos vistosos podemos apostar con razonable seguridad a que, en lo que respecta a su descendencia, ellos solo participan proporcionando esperma. Ya que no intervienen en etapas posteriores del ciclo reproductor, vuelcan todos sus recursos en atraer a la mayor cantidad posible de hembras. Su manera de pasar más genes propios a la siguiente generación consiste en multiplicar los apareamientos, mientras que las hembras dependen de los huevos que pongan y de su calidad. Recordemos que la evolución refleja el éxito reproductivo. Con este reparto de papeles, ellos ganan a base de cópulas; ellas, con el número de huevos que consigan sacar adelante. Los machos menos atractivos se quedarán sin pareja y cualquier gen exclusivo que portaran languidecerá en la cuneta evolutiva.

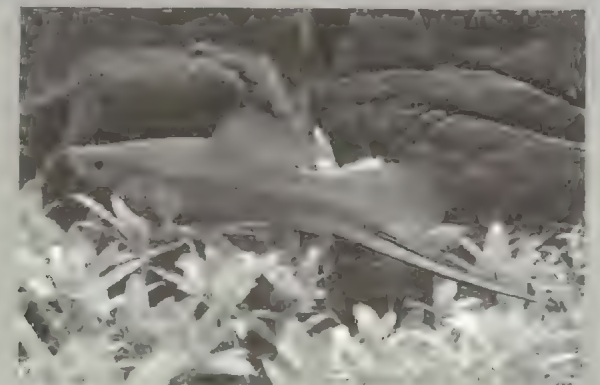
Los machos que colaboran en el cuidado de las crías no pueden malgastar tantos recursos en la exhibición del cortejo, porque el departamento reproductivo no tardará en exigir a sus organismos nuevos desembolsos energéticos. En las especies de aves en las que ambos sexos preparan juntos el nido, se alternan en la incubación de los huevos y en la alimentación de los polluelos,

EL ARTIFICIO DE LA SEDUCCIÓN

Algunos experimentos han explorado la manipulación ante rangos ficticios, en una suerte de estudio de manipulación sexual. El género de peces *Xiphophorus* engloba especies con y sin cola de espada, un tipo de aleta caudal peculiar, exclusiva de los machos, cuyo lóbulo inferior se proyecta hacia atrás a modo de estilete. La zoóloga Alexandra Basolo probó a pegar prótesis de cola de espada en machos de una de las especies que no la han desarrollado. ¿Qué efecto produjo la operación? Los peces adulterados cautivaron a las hembras, mientras que los genuinos fueron ignorados. Dado que la especie con cola de espada alargó el lóbulo inferior de su aleta a partir de un ancestro sin ella, el experimento arroja luz sobre el origen de la modificación anatómica. La reacción de las hembras de *Xiphophorus* sugiere que, de algún modo, su sistema cognitivo ya albergaba un prejuicio estético que solo pudieron manifestar después de que una mutación alterase el desarrollo de los machos. Una sólida evidencia a favor de que el gusto puede proscribir selectivamente y cambiar el diseño corporal del sexo opuesto.

Maquillaje evolutivo

En otros experimentos, se han añadido crestas y colas postizas a las aves o se ha distorsionado el canto nupcial de las ranas, rebajando su frecuencia. Las hembras suelen dar la bienvenida a la excepcionalidad cuando se presenta. Si las mutaciones insinúan cualquiera de estos rasgos en los machos, la selección sexual favorecerá su expresión plena, siempre y cuando no viniera acompañada de contraindicaciones imprevistas.



Dos especies del género *Xiphophorus*. *Xiphophorus maculatus* (arriba) remata su cuerpo con una aleta caudal normal. *Xiphophorus hellerii* (abajo) ostenta una cola de espada.

el macho y la hembra muestran un aspecto semejante. Al mismo tiempo, la atribución de actitudes selectivas o competitivas se vuelve más difusa. En las raras especies en las que los machos se implican más en la crianza que las hembras, los caracteres secundarios también se invierten: las hembras se vuelven más llamativas y rivalizan por los machos. Así ocurre con los peces aguja, cuyos machos incuban los huevos que reciben de la hembra en una bolsa ventral formada por un repliegue de la piel, o con los playeritos manchados, pequeños pájaros limícolas que dedican más tiempo que las hembras a empollar y atender a las crías.

Se puede reinterpretar la guerra de sexos rebajando el énfasis en el importe de la factura energética. Un esfuerzo desigual en la concepción y cuidado de los hijos deja al sexo que menos contribuya con más tiempo para buscar nuevas parejas. Y viceversa. A un lado de la línea divisoria encontraremos una mayoría de machos disponibles; al otro, la uniformidad se rompe: habrá hembras dispuestas y hembras ocupadas. Esta disparidad conduce directamente a la competencia. Como, por regla general, el número de machos libres superará al de las hembras, rivalizarán entre sí, mientras que ellas tendrán donde elegir. En este escenario, la mayoría de las hembras se apareará, mientras que muchos machos quedarán fuera del circuito reproductivo. Por la misma razón, el reparto de papeles habitual se puede alterar en poblaciones en las que las circunstancias han modificado la proporción entre machos y hembras disponibles.

La interacción de factores muy diversos, como la abundancia o escasez de alimento, o de predadores, o de espacios donde efectuar la puesta de los huevos, difumina las líneas generales que acabamos de esbozar. Los animales no reaccionan como autómatas ante la tornadiza influencia del entorno. Aunque la actitud selectiva predomine en las hembras, a veces se ven en la tesitura de competir por una pareja o por su posición dentro de un grupo. En el bando contrario, el pavoneo o la lucha de los machos no excluyen la elección. Por último, la selección sexual no es responsable de todas las diferencias anatómicas secundarias. En la mayoría de los insectos y peces, por ejemplo, un cuerpo femenino más grande favorece la fecundidad. La especialización

en distintos tipos de presa, para reducir la competencia por la comida entre machos y hembras de la misma especie, también provoca divergencias en las dimensiones corporales.

Tanto el altruismo como la selección sexual revelan hasta qué punto cualquier fórmula que aumente la presencia de genes propios en la siguiente generación se abre un camino evolutivo, ya suponga dejarse devorar, dar la vida por un pariente o exhibirse como un pavo real.

Más allá de la selección natural

¿Existe evolución al margen de la selección natural? Algunos científicos cuestionan su papel hegemónico. El candidato mejor situado para disputarle su primacía es otro mecanismo evolutivo bien establecido: la deriva génica. Más controvertidas resultan otras propuestas, que pretenden derribar algunos pilares de la interpretación ortodoxa de la evolución.

Existe un mecanismo evolutivo, la deriva génica, en el que no solo no interviene la selección natural, sino que puede llegar a conspirar en su contra. El peso relativo de cada alelo dentro del genoma de una especie cambia de una generación a la siguiente. Aun cuando fuéramos capaces de reprimir las mutaciones, la cantidad de individuos que portan un alelo específico no se mantendría constante con el paso del tiempo. Pongamos por caso que, en un momento dado, un 30% de los integrantes de una población posee la variante A de un gen; el 50%, la variante B; y el 20%, la variante C. ¿Qué procedimiento habría que seguir para que estos porcentajes se respetasen en la siguiente generación? Ocurriría, de forma un tanto inverosímil, si todos los individuos tuvieran un hijo con su misma pareja de alelos (y hubiera tantos hijos como padres). De entrada, sin embargo, la lotería reproductiva transmite un solo alelo de cada progenitor (nos limitamos aquí, por simplicidad, a los organismos diploides), luego hay variantes que pasarán a la descendencia en mayor medida que otras. Además, no todos los miembros de la población se reproducen y, quienes lo hacen, tampoco se muestran igual de prolíficos. Por no mencionar que algunos fallecen.

Conclusión, los porcentajes varían inevitablemente. Los valores pueden ser más o menos acusados, hasta el punto de que si el 20% que portaba el alelo C muere, este desaparezca del acervo de la especie. La posibilidad que encarnaba morirá también y resultará inaccesible para cualquier hijo. La eliminación del rasgo asociado afecta a toda la comunidad, que evoluciona. Hay más probabilidades de que semejante accidente suceda en una población reducida. No es lo mismo el 20% de 10 000 individuos (el azar tendría que acabar con 2 000) que de 50 (serían solo 10). Ni siquiera hace falta invocar un escenario tan dramático en el que mueran todos los portadores de C, basta con que no procreen o que, de hacerlo, el alelo en cuestión no se transmita a sus descendientes. Esta pérdida puede afectar particularmente a innovaciones genéticas que no han tenido ocasión de destacarse, porque no las ha promovido un cambio de las circunstancias ambientales.

Las mutaciones amplían el catálogo de opciones de un repertorio génico y, con ello, aumentan los recursos para responder a las exigencias del entorno. La pérdida de variedad genética por puro azar modifica rasgos de la especie, y por tanto la hace evolucionar, pero lo hace con una absoluta falta de criterio, sin atender a los efectos perjudiciales o beneficiosos de los genes que barre. Visto desde la perspectiva del resto de las alternativas, la erradicación de C supone la automática promoción de A y B, al margen de las ventajas que aporte cada alelo. La deriva funciona como una rueda sin trinquete, un mecanismo ciego que no genera adaptaciones. En el segundo capítulo consideramos los ejemplos del pez que adquiere mejores defensas y es aniquilado por una red de arrastre y de la planta que ajusta su floración a una mudanza del clima y es sepultada por un movimiento de tierras. Los dos percances se llevan por delante una adaptación ventajosa que ni siquiera ha tenido la oportunidad de propagarse en el genoma correspondiente. El ciego azar puede borrar del repertorio genes por muy provechosos que resulten y por mucho que la presión ambiental los favorezca. Tanto la selección como la deriva son agentes de cambio que actúan sobre los repertorios génicos de las poblaciones. La incidencia de la deriva

es menor en poblaciones amplias, donde las variantes génicas están muy repartidas y los desequilibrios fortuitos suelen cancelarse en promedio.

La reducción en la riqueza del genoma común también se produce cuando pequeñas comunidades de individuos quedan aisladas y progresan de modo independiente. Emprenden entonces su aventura evolutiva particular manejando un repertorio de genes más restringido que el de la población que dejaron atrás. La selección del conjunto de genes que portan, además, obedecerá al azar que formó el grupo. Retomando nuestro ejemplo, puede no incorporarse a él ningún miembro con la variante C de un gen. Acontece lo mismo cuando una súbita falta de alimento, una catástrofe medioambiental o una afluencia excesiva de depredadores diezman una población. La grasa del elefante marino del norte fue muy preciada en el siglo XIX, desatando una campaña de caza abusiva que a punto estuvo de borrar del mapa a la especie. En torno a la década de 1890, se dio por extinguida. Seguramente el celo de los balleneros se llevó por delante a muchos de los elefantes marinos mejor adaptados a su entorno y a los supervivientes solo les cupo dar gracias a la diosa Fortuna. El censo llegó a bajar del centenar de ejemplares, pero no todos murieron. Al resguardo de Isla Guadalupe, lograron recuperarse poco a poco y hoy en día su población supera los cien mil elefantes marinos. La cicatriz histórica que se ha llevado la especie ha sido la pérdida de diversidad génica, ya que miles de individuos proceden del repertorio armado con los escasos supervivientes de la crisis de 1890, que conservaban en sus células solo una fracción de los alelos originales. Esta merma limita su gama de alternativas para adaptarse a los retos del entorno (figura 1).

Existe una cierta controversia en torno al peso que se debe otorgar a la selección natural o a la deriva génica en el rumbo que adopta el proceso evolutivo. Ya comentamos que no todos los rasgos que caracterizan a un organismo, y por tanto sus genes asociados, inciden en la supervivencia o las expectativas de reproducción. Ese grupo de alelos, al que sería ciega la selección natural, conquistaría su lugar en el genoma (o lo perdería)



a través de la deriva. Incluso los genes que aportan adaptaciones ventajosas pueden verse barridos por ella. El azar de la deriva y el criterio de la selección natural echan un pulso, donde cada agente compite con un empuje que depende de las circunstancias (de la magnitud de la población, por ejemplo), de manera que no siempre se impone la mejor opción, patrocinada por la selección. El principal obstáculo para resolver la preponderancia de una u otra fuerza radica en la dificultad de establecer si un cambio en un gen afecta de algún modo, o no, a la supervivencia o las expectativas de reproducción. Certificar que un cambio evolutivo ha tenido lugar sin que intervenga la selección natural, para atribuírselo a la deriva, resulta arduo. Siempre cabe la posibilidad de que, después de todo, haya actuado la selección, pero su mediación haya pasado desapercibida.

¿UNA EVOLUCIÓN 3.0?

La teoría de la evolución ha conocido dos momentos decisivos en su siglo y medio de historia. El primero corresponde al hito fundacional a cargo de Darwin y Russel Wallace, aunque, como ocurre con casi cualquier disciplina, si uno se empeña, puede rastrear antecedentes hasta, como mínimo, los filósofos presocráticos. El segundo se fraguó a lo largo de la primera mitad del siglo xx, a medida que los diversos ríos de la biología desembocaban en la evolución, enriqueciéndola con los últimos descubrimientos en paleontología, genética o bioquímica. Con ayuda de sofisticados modelos matemáticos, las novedades no solo encajaron en los presupuestos darwinistas, también extendieron sus raíces y desvelaron

en gran medida su mecánica interna. Así se consolidó la llamada síntesis moderna de la evolución, en la que participaron, entre otros muchos científicos, Ronald Fisher, John Burdon Sanderson Haldane, Sewall Wright, Theodosius Dobzhansky, Ernst Mayr o Ledyard Stebbins.

Ya entrado el siglo xxi, nuestro conocimiento de la biología no ha cesado su expansión. Entre la escala que exploraron Darwin y Wallace, de metros, centímetros y milímetros, y la de los ángstroms, en la que se revelan los entresijos de la dinámica celular, tercian siete órdenes de magnitud. En ese amplísimo margen abundan las vetas de información que todavía no se han agotado. ¿Su estudio se limitará a proporcionar una mayor resolución a la imagen establecida o dará un vuelco a su interpretación? ¿Quedan por desentrañar agentes evolutivos con igual o mayor peso que la selección natural o la deriva génica? Se han propuesto, y se investigan, alternativas que tratan de minar el imperio de los genes y sus mutaciones. Muchas centran su atención en el desarrollo embrionario y en la ecología. Veamos por qué.

Aunque cada célula de un organismo pluricelular posea idéntico ADN, este no muestra el mismo aspecto en todas ellas. ¿Por

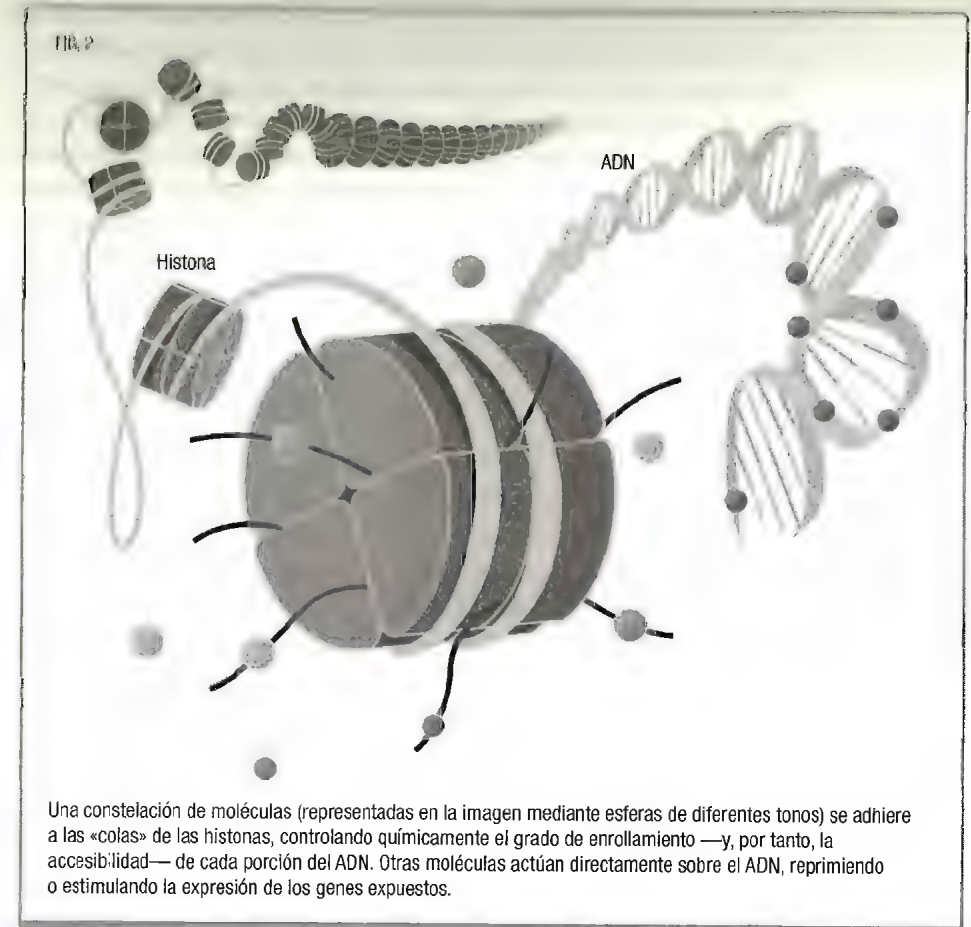
Además, estoy convencido de que la selección natural ha sido el principal, pero no el único, mecanismo de modificación.

CHARLES DARWIN, *EL ORIGEN DE LAS ESPECIES*

qué? La razón obedece a que no se trata de un fichero de información virtual, sino de un objeto físico tridimensional, una molécula, susceptible de adoptar distintas «posturas». En los seres humanos la doble hélice alcanza casi dos metros de longitud, que, obviamente, no cabrían extendidos dentro de las células, cuyo diámetro no suele superar el centenar de micras. El ADN se enrolla, como si fuera un hilo, en torno a un grupo compacto de carretes, constituidos por proteínas (las histonas). En este estado recogido, gran parte de la hebra resulta inaccesible (figura 2). Para que la maquinaria celular pueda imprimir una proteína, antes hay que exponer la secuencia de letras que la codifica, operación que requiere mover los carretes. ¿Y qué los desplaza? Las interacciones electromagnéticas con una constelación de moléculas que pululan en torno al ADN y las histonas.

Entre ellas se cuentan proteínas que regulan la actividad de los genes (disponiendo cuáles se han de traducir o no en cada célula y con qué frecuencia) y moléculas más simples que se pueden adherir a las letras del ADN bloqueando su lectura. En el medio celular también pululan moléculas capaces de interrumpir *in extremis* la traducción iniciada por los ribosomas. Los detalles son complejos, pero la idea de fondo es clara. No basta con almacenar información, esta tiene que resultar accesible y llegar sin incidentes hasta la imprenta celular de las proteínas. Una serie de moléculas administran el legado genético, determinando qué instrucciones deben leerse en cada momento y lugar. La *epigenética* estudia el terreno que media entre las posibilidades que atesora el ADN y su materialización.

Los animales constan de unos treinta mil trillones de células. Si todas fueran iguales, conformarían una gigantesca masa de gelatina. Muy al contrario, el tapiz de los tejidos se urde con un rico repertorio de cientos de variedades celulares, que comprenden desde estrelladas neuronas a los discos de los glóbulos rojos o las finas espigas de las fibras musculares. ¿Cómo pueden diferir tanto en su aspecto y sus funciones si todas albergan el mismo ADN? Las proteínas son las responsables de la diversidad. Algunas desempeñan funciones estructurales y arman varillas, como los palos de una tienda de campaña, dando soporte a la



célula y definiendo su arquitectura. También participan en su división y facilitan su movilidad. Las proteínas ejercen múltiples oficios, son mensajeras, transportistas, emisoras y receptoras de señales... Por otro lado, el medio celular se parece a la retorta de un alquimista y contiene infinidad de moléculas, que no reaccionan salvo en presencia de tipos particulares de proteínas, las enzimas. Las que salgan de los ribosomas decidirán la línea de productos químicos que elabore cada fábrica celular. Así, algunas segregan cristales de hidroxiapatita, que se acumulan en el

medio extracelular, confiriendo dureza a los dientes y los huesos. Otras excretan proteoglicanos, que dotan de resistencia y elasticidad a los cartílagos, o elastina, que proporciona flexibilidad a los vasos sanguíneos.

Comenzamos diciendo que todas las células de un organismo llevan el mismo ADN, pero que en ellas adopta posturas diferentes, que exponen ciertos genes y ocultan el resto. Esta disponibilidad selectiva trae consigo la síntesis de proteínas distintas, que fundan una química y arquitectura celulares propias. Una célula del páncreas, por ejemplo, dispone de las instrucciones para fabricar receptores olfativos o secretar hidroxapatita, pero, simplemente, no hace uso de ellas. Cada célula de un tejido acude al archivo del ADN común, y de él imprime tan solo las proteínas que le interesan y que lo caracterizan como cartílago, hueso, fibras musculares, epitelio pulmonar, vasos sanguíneos, masa encefálica o nervios. Una vez que una célula se especializa, retiene sus *marcas epigenéticas* cuando se duplica. Es decir, no solo replica el ADN, sino también la corte de moléculas que condiciona su postura. Las células del hígado, cuando se renuevan, producen más células del hígado.

Durante el desarrollo embrionario, la pluripotencialidad del ADN se manifiesta en todo su esplendor. El proceso se ha comparado con una suerte de papiroflexia. La analogía exige, desde luego, un papel con virtudes mágicas. Nadie lo pliega y, a medida que emerge la figura, se va creando más papel. No aflora al mismo ritmo en todos los puntos, haciendo que unas porciones se abatan sobre otras, que surjan protuberancias o depresiones. La figura no se extrae, por tanto, como en una escultura, de un bloque de material del que se van retirando fragmentos. Crece a partir de una bola de cien micras de diámetro: el óvulo fecundado. La masa aumenta por división celular a costa de la sustancia que suministra el huevo. Acumular mayor o menor número de células en una zona deforma el volumen de la esfera, la infla o deprime, genera bultos, huecos o repliegues. Al mismo tiempo, la propia textura del papel va cambiando de unas zonas a otras. Cada célula sintetiza proteínas diferentes, que determinan su naturaleza. La figura toma forma mientras en unas regiones se ex-

pansionan parches de hueso; en otras, de piel, de tejido adiposo o de músculo. ¿Cómo sabe cada célula qué secciones del ADN debe leer para cumplir su función como neurona o fibroblasto? Ninguna de ellas conoce el plan general, desde luego, que no se declara en ningún lugar. La expresión de unos genes u otros viene condicionada por la herencia que reciba cada célula de su célula madre y por la química de su entorno inmediato. Esta última la establecen al principio las células que rodean al óvulo y luego la van alterando y modulando las propias células del embrión a medida que surgen. El desarrollo completo se orquesta mediante relaciones locales de cada célula con sus vecinas. Todas ellas son sensibles a los mensajeros químicos de las inmediaciones y pueden segregar sus propias señales.

¿Qué implicaciones tiene todo esto para la evolución de las especies que pertenecen a los principales linajes pluricelulares? De entrada, en el desarrollo embrionario se plasman los resultados de las mutaciones. Un gen modificado puede estimular la proliferación de células en una región específica, o la secreción de ciertas moléculas en el medio extracelular, extendiendo la superficie de fotorreceptores, alargando una extremidad o alterando su forma, o incrementando la resistencia de un tejido. O produciendo una malformación fatal.

El estudio del desarrollo ofrece, además, pistas de por qué algunas etapas de la evolución de las especies obran con más rapidez y revela por qué ciertos genes son alérgicos a las novedades mientras que otros están abiertos a la experimentación. A pesar de discrepancias evidentes, contemplados con la debida distancia, un ave, un anfibio, un mamífero o un pez presentan un incontestable aire de familia. Al margen de branquias o pulmones, alas o aletas, morros o picos, escamas o plumas, todos muestran simetría bilateral: su cuerpo se puede cortar por un plano imaginario que lo dividiría en dos bloques, siendo cada uno, muy aproximadamente, la imagen en un espejo del otro. Además poseen cabeza, ojos, columna vertebral y extremidades. Este diseño forma parte de un catálogo de treinta y cinco modelos anatómicos que cubren todas las variantes animales. Surgieron en un lapso evolutivo relativamente breve, a lo largo de

unos diez millones de años, durante el período Cámbrico. En los quinientos millones de años que sobrevinieron después no se ha sumado al catálogo ningún plan nuevo. Una singular colección de genes reguladores define las líneas maestras de estos diseños y ha forjado un marco que, de momento, ninguna especie ha sabido quebrantar. Codifican proteínas que intervienen en el desarrollo embrionario, actuando sobre el ADN, promoviendo o inhibiendo la lectura de genes clave, decidiendo la naturaleza de las células en determinados momentos y ubicaciones, la extensión de los tejidos. Desempeñan además muchas funciones distintas, no siempre directamente relacionadas, de modo que alterarlos puede acarrear múltiples consecuencias. Su trascendencia coarta el azar de las mutaciones a la hora de jugar con los diseños corporales. Durante la gestación opera una primera criba antes de que la selección natural tenga ocasión de actuar sobre el organismo. O, mejor dicho, la selección ya interviene en el embrión, antes de que el organismo haga frente a predadores, parásitos o una carestía de alimentos.

Se especula sobre la posibilidad de que el verdadero motor de la evolución anatómica animal radique en esta particular colección de genes reguladores. Sería más determinante entonces un cambio en el modo de organizar la actividad de genes ya presentes —expresarlos en momentos o lugares distintos, o con diferente intensidad—, que introducir en el juego genes nuevos. Por ejemplo, para la formación de patas, y más tarde de alas, bastó con reprogramar las tareas de genes que ya participaban en el modelado de las aletas de los peces. Cabe preguntarse, por tanto, si muchas ventajas adaptativas obedecen a la introducción de genes nuevos o más bien a nuevos modos de gestionar los antiguos. No existe consenso al respecto. Sea como fuere, la reprogramación se llevaría a cabo mediante mutaciones en los genes reguladores —alojados, como los demás, en el ADN—, que tendrían que recibir el visto bueno de la selección natural.

El vasto escenario que abre la epigenética ha inspirado la búsqueda de fisuras en la interpretación evolutiva tradicional. El término surgió asociado a la especialización celular que hace posible el desarrollo del embrión, pero hoy en día suele utilizarse en otro



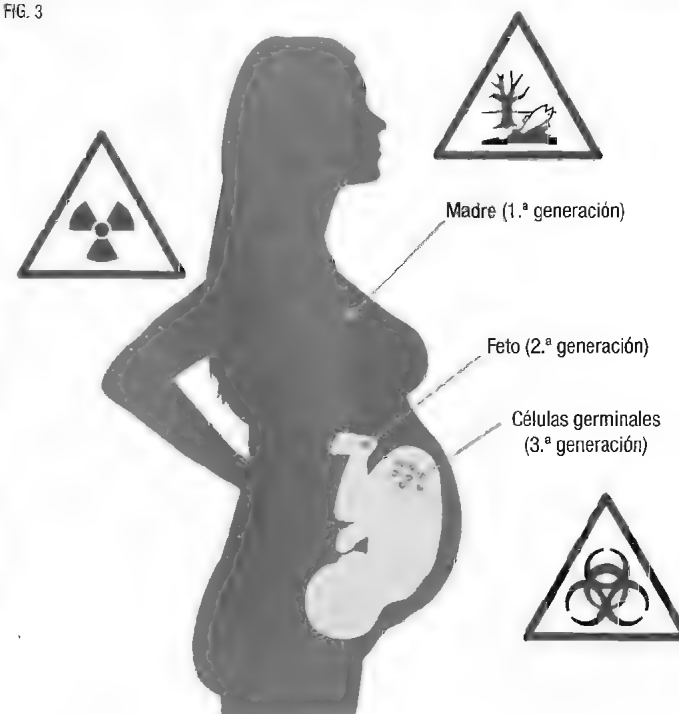
El genoma de la langosta del desierto (*Schistocerca gregaria*) permite definir dos insectos de aspecto y comportamiento distintos. Arriba se muestra la fase solitaria; abajo, la gregaria (de color más llamativo y menor tamaño).

sentido. A lo largo de su vida, un organismo no puede modificar la secuencia de letras A, C, G y T grabada a fuego en su ADN, pero sí las posiciones que adopta la doble hélice. Qué genes se expresan y cuáles no. Las células reaccionan a factores ambientales que logren, a través de una cadena de causas y efectos, repercutir en su medio extracelular. El desencadenante puede ser la alimentación, el estrés, la exposición a contaminantes o la temperatura. La sensibilidad celular a su entorno inmediato induce entonces cambios en su química interna, llegando en ocasiones a perturbar el ecosistema de moléculas que gravita en torno al ADN y que controla el acceso a cada región del genoma. Pueden resucitar así genes dormidos, algunos de ellos perjudiciales. Las reacciones al ambiente también permiten a las plantas florecer tras el frío del invierno o, a los insectos que imitan a las hojas, adoptar un color marrón en otoño y uno verde en primavera. El entorno puede alterar las marcas epigenéticas, trastornando la dinámica celular, ocasionando enfermedades o adaptaciones útiles.

En definitiva, la herencia genética no está escrita en piedra y admite una cierta libertad en su expresión, o plasticidad. Los insectos ofrecen ejemplos fascinantes. Cuando algunas especies de saltamontes se aglomeran, se transforman en voraces langostas. La propia metamorfosis de la oruga en mariposa se basa en lecturas diferentes del mismo genoma. Una alimentación privilegiada, a base de jalea real, activa genes en la larva que se convertirá en abeja reina que permanecen latentes en las obreras. El genoma de estas especies exhibe una flexibilidad provechosa que surgió fortuitamente y que vino a fijar la selección natural. Dentro del campo evolutivo, la cuestión es si las modificaciones epigenéticas se pueden heredar y provocar especiación. De hacerlo, estaríamos ante un mecanismo lamarkista: rasgos adquiridos durante la vida de un individuo (posturas específicas de su ADN) se transmitirían a la descendencia. Antes de resucitar al espectro de Jean-Baptiste de Lamarck, empero, hay que superar una barrera. Las células de un organismo adulto ya se han especializado cada una en su tarea y, para iniciar la papiroflexia embrionaria, hay que generar una célula virgen, que exhiba sin sesgo alguno la plena pluripotencialidad del ADN. En el proceso de preparación de los

óvulos y espermatozoides (y del polen de las plantas), se borran las marcas epigenéticas. Aun así, parece que, en ocasiones, algunas burlan la operación de limpieza. Se han investigado casos en los que alteraciones epigenéticas se manifiestan en hijos y nietos. Conviene considerarlos con la debida precaución, porque no hace falta que medie herencia alguna para que tres generaciones queden expuestas a los mismos agentes simultáneamente. Un factor ambiental que repercuta en las células de una mujer embarazada, puede hacerlo a la vez en las células de la hija que está gestando, e incluso en las de sus nietos, puesto que el feto femenino alberga ya todos sus óvulos, aunque inmaduros (figura 3).

FIG. 3



Una hambruna o un agente tóxico pueden hacer diana a la vez en tres organismos, que pertenecen a tres generaciones diferentes.

En organismos con mecanismos de borrado un tanto laxos, como las plantas y los gusanos nematodos, se ha documentado la transmisión hereditaria de rasgos epigenéticos, pero los mamíferos *resetean* su ADN con mucha mayor eficacia. Aun cuando el fenómeno también se confirmase en ellos, todavía habría que tener en cuenta los plazos que maneja la evolución. Las contorsiones que el ambiente imponga al ADN pueden deshacerse de una generación a la siguiente, precisamente porque no se han apuntalado en los genes, como las mutaciones. Quizá, por tanto, las perturbaciones epigenéticas reviertan tan súbitamente como surgieron y terminen causando un impacto nulo a largo plazo. A este respecto, el lamarckismo debe hacer frente a un abultado expediente de pruebas en su contra. A comienzos del siglo xx, se puso en marcha un exhaustivo programa experimental con plantas. Se utilizaron especímenes genéticamente idénticos y, de cada generación, se seleccionaron y se cruzaron aquellos que exhibían atributos más extremos inducidos, a lo largo de su vida, por el ambiente. Se sucedieron las generaciones y ninguna de las tendencias se consolidó en la descendencia. En este punto merece la pena recalcar que el borrado epigenético resulta más imperfecto precisamente en las plantas.

También se ha contemplado la posibilidad de que la plasticidad sirva de preludeo a las mutaciones. Para ello, el ambiente tendría que suscitar una adaptación en los organismos —sin tocar la secuencia de letras del ADN—, que más adelante se consolidaría, ahora sí, por medio de mutaciones. De momento no se ha constatado la acción de semejante mecanismo, que no se debe confundir con la aparición de nuevos rasgos cuando alguna alteración en el ecosistema explota las virtudes de una sección del genoma marginada hasta entonces.

Los fenómenos que estudian la epigenética, la biología evolutiva del desarrollo, la plasticidad o la teoría de construcción de nichos cuentan con una base científica sólida, pero no existe consenso acerca de qué relevancia acabarán teniendo para la evolución. Los entusiastas anuncian que traerán consigo una tercera revolución. Los ortodoxos consideran que sus contribuciones caben cómodamente en la síntesis moderna y que tan solo

EL CONTRAATAQUE DE LAS ESPECIES

En el otro extremo de la escala biológica, lejos de las interioridades celulares, la heterodoxia reivindica la capacidad de los seres vivos de alterar el entorno. La teoría de construcción de nichos cuestiona la imagen clásica de un medio que propone retos a los organismos para que estos respondan exclusivamente a través de los resortes de su variabilidad genética.

Herencia ecológica

Los seres vivos no solo acusan la presión ambiental, también la menoscaban. Además, los frutos de su esfuerzo se heredan de manera sostenida (por una vía no genética), puesto que los organismos reciben el medio con las reformas que practicasen en él las generaciones precedentes. Así, la anatomía de las lombrices de tierra parece pensada para el medio acuático, pero, en lugar de evolucionar para adaptarse al suelo, lo transforman física y químicamente hasta convertirlo en un hábitat adecuado. Darwin ya reparó en esta circunstancia en su último libro, *La formación del mantillo vegetal, por la acción de las lombrices*, que publicó en 1881, seis meses antes de su muerte. Las discrepancias giran en torno al poder que cada uno quiera otorgar a las poblaciones para responder a las tendencias evolutivas que los afectan y condicionarlas. Algunos biólogos defienden que la herencia ecológica, levantada mediante acciones nada fortuitas, podría influir tanto en los procesos evolutivos como la selección natural.

Caricatura de Darwin absorto en el estudio de las lombrices de tierra, publicada en la revista satírica inglesa *Punch*, en 1881. El autor del dibujo es Edward Linley Sambourne.



proporcionan más información sobre cómo opera el mecanismo evolutivo, perfectamente caracterizado ya, por muy fascinantes que resulten los detalles o algunas excepciones. La selección natural de las evidencias experimentales decidirá a favor de unos u otros. El debate demuestra que nada en la biología le es ajeno a la evolución. Una disciplina que sigue viva y abierta al asombro y la curiosidad por el mundo natural que animó a sus creadores decimonónicos.

- AYALA, F.J., *La teoría de la evolución*, Madrid, Temas de Hoy, 1997.
- COYNE, J.A., *Por qué la teoría de la evolución es verdadera*, Barcelona, Crítica, 2010.
- DARWIN, C., *El origen de las especies*, Madrid, Alianza, 2007.
- DAWKINS, R., *Evolución*, Barcelona, Espasa, 2011.
- FORTEY, R., *La vida. Una biografía no autorizada*, Madrid, Taurus, 1999.
- GOULD, S.J., *La estructura de la teoría de la evolución*, Barcelona, Tusquets, 2010.
- LANE, N., *Los diez grandes inventos de la evolución*, Barcelona, Ariel, 2009.
- : *La cuestión vital*, Barcelona, Ariel, 2016.
- SAMPEDRO, J., *Deconstruyendo a Darwin*, Barcelona, Crítica, 2013.
- SHUBIN, N., *Tu pez interior*, Madrid, Capitán Swing, 2015.

- Acanthostega* 95, 96
 acervo génico (*también*
 repertorio génico) 25, 54-56,
 58-60, 64, 71, 72, 79, 83, 105,
 140, 141
 actinopterigio, pez 37
 alelo 51, 55, 58-62, 71, 98, 139-142
 dominante 60
 recesivo 60
 altruismo 72, 121-123, 135
 aminoácido 49, 50, 53, 56, 57, 84,
 93
 anemia falciforme 61, 62
Angraecum sesquipedale 113-
 115
 arquea 9, 31, 33-35, 38, 49, 67-69,
 111, 120

 Basolo, Alexandra 133
 Bateman, James 113
 Beadle, George 65
 Beliaev, Dimitri 91, 92, 97

 biología evolutiva del desarrollo
 146-148, 152

Canadia spinosa 23
 coevolución 12, 112-121
Coryanthes 114, 116, 117
 cromosoma 25, 52, 53, 55, 60,
 77

 Darwin, Charles Robert 10-12,
 30, 33, 43, 47, 86, 113, 114, 117,
 125, 126, 129, 130, 132, 143,
 153
 deriva génica 139-143
 diploide, organismo 60
 Dobzhansky, Theodosius 12, 143
 dodo 102, 111
Drosophila 94

 Endler, John 22
 epigenética 144, 148-152
 marca 146, 150, 151

Escherichia coli 49, 68
 especiación 25, 43, 66, 67, 70, 71, 150
 eucariota
 célula 9, 30, 34, 35, 38, 39, 52, 53
 organismo 31, 33, 42, 48, 68, 69, 88
 fenilcetonuria 54, 93
 Fisher, Ronald 143
 flujo génico 71
formación del mantillo vegetal, por la acción de las lombrices, La 153
 genoma 18, 30, 36, 48, 51, 54, 56, 57, 59, 60, 63, 64, 67, 68, 70-74, 76, 77, 83, 96, 98, 99, 103, 112, 122, 124, 125, 127, 131, 139, 140, 141, 150, 152
 Gray, Asa 117
 Haldane, John Burdon Sanderson 143
Hallucigenia sparsa 20, 23
 Helmholtz, Hermann von 86
 histona 144, 145
hombre lobo americano en Londres, Un 76
 icneumonída, avispa 117, 118
 Lamarck, Jean-Baptiste de 104, 105, 150
 lamarckismo 150, 152
 laríngenos recurrentes, nervios 104, 107
 lebiste, pez 22, 125, 126, 130, 131
 Linneo, Carlos 28-30, 33
 lofiforme, pez 99
 macroevolución 26
 Margulis, Lynn 34, 35
 mariposa de los abedules 20, 22, 57, 58, 98
 Mayr, Ernst 143
Meganeura 98
 Merejkovski, Constantin 34
 Microevolución 24
 Mitochondria 34, 35, 53
Myrmeconema neotropicum 118
Ophrys insectifera 114
origen de las especies, El 11, 129
origen del hombre y la selección en relación al sexo, El 129
 Paley, William 86
 parasitismo 117-120
Pinus contorta 24
 plasticidad genética 150-152
 poliploidía 25, 70
 procariota
 célula 31, 34, 35, 48
 organismo 38, 68, 111
 radiolario 84, 85
 ribosoma 48-50, 52, 53, 56, 57, 73, 144, 145
Rimicaris exoculata 89
 sarcopterigio, pez 77, 100
 Schimper, Andreas 34
Schistocerca gregaria 149
 selección
 artificial 58, 129
 natural 10, 11, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 25, 28, 31, 34, 35, 40, 57-63, 68-73, 83, 84, 86, 88, 92-105, 111, 118, 120-122, 126-129, 139-143, 148, 150, 153, 154

sexual 12, 124, 125, 128, 130, 132-135
 Sobre la tendencia de las variedades a alejarse indefinidamente de una forma original (artículo) 71
Spinochordodes tellinii 118
 Stebbins, Ledyard 143
Supersaurus 107
 Tennyson, Alfred 122
 Teocinte 36, 65
 teoría de construcción de nichos 11, 152, 153
 tetrápodo 77, 95, 96, 105, 107
Tiktaalik 77-79, 96
Theroplasma gondii 119, 120
 transferencia lateral de genes 68, 69
Therapsid 95, 96
 vestigio 9, 101, 103
 Wallace, Alfred Russel 10, 11, 47, 71, 113, 114, 129, 143
 Wallin, Ivan 34
 Whitehead, Alfred North 52
 Wright, Sewall 143
Xanthopan morgani 113-115
Xiphophorus 133

La evolución

No sabemos si la vida ha evolucionado en otros lugares del universo, pero, se trate o no de un acontecimiento único, de lo que no hay duda es de que el surgimiento de millones de especies a partir de un cúmulo de células primitivas constituye uno de los fenómenos más fascinantes que se hayan dado en el cosmos. Los seres vivos han coronado cumbres de complejidad mucho más elevadas que las partículas elementales, las estrellas o las galaxias. ¿Cómo han llegado a desarrollar su asombrosa diversidad, que abarca desde una bacteria a un mamut, pasando por una orquídea, un tiranosaurio, un alga o una levadura?

David Blanco Laserna es físico y escritor.